

Трекин Г.Е., Шевченко О.И. Формирование заготовки при аддитивном изготовлении наплавкой под флюсом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 49–56. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.06

Trekin G.E., Shevchenko O.I. Formation additive metal piece by means of submerged arc welding. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 49–56. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.06

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 4, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.06
УДК 621.791.92

Г.Е. Трекин, О.И. Шевченко

Нижнетагильский технологический институт, филиал Уральского федерального университета
им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижний Тагил, Россия

**ФОРМИРОВАНИЕ ЗАГОТОВКИ ПРИ АДДИТИВНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ НАПЛАВКОЙ
ПОД ФЛЮСОМ**

Рассмотрено формирование геометрических характеристик наплавленного валика и структуры наплавленного металла при аддитивной дуговой наплавке проволокой 30ХГСА диаметром 3 мм под флюсами различной основности. Исследовано распределение химического состава и твердости по высоте наплавленного металла. Определены доля и распределение по размерам неметаллических включений в центре наплавленного металла. Показано, что при порядовой наплавке дугой постоянного действия на типовых режимах формируется стенка толщиной около 18 мм с волнистыми боковыми поверхностями. От предыдущего валика остается непереплавленным только слой толщиной около миллиметра, поэтому наплавленный металл подвергся полностью автотермоциклической обработке короткими циклами от значений температуры предплавления до низкого отпуска. Это приводит к образованию относительно твердого верхнего валика с дисперсной ферритно-мартенситной структурой и термоциклированных низлежащих тонких слоев с ферритно-перлитной структурой. Наибольшая доля и размеры неметаллических включений наблюдались при наплавке под кислым флюсом, наименьшие – при применении нейтрального и основного флюсов. Анализ распределения неметаллических включений по размеру показал, что наибольшая доля мелких включений до 1 мкм^2 характерна для нейтрального и основного флюсов. Выявлено, что при наплавке под кислым (АН 348-А) и нейтральным (ФСА ЧТА 650-20/80) флюсами образуется металл типа 13Г2СХ, а под основным флюсом (UF-01) – 20ГСХ при равномерном распределении химического состава по высоте наплавленного валика. Даны рекомендации по совершенствованию технологии наплавки и выбору флюса.

Ключевые слова: аддитивные технологии, наплавка под слоем флюса, формирование наплавленного слоя, неметаллические включения, химический состав наплавленного металла, автотермоциклическая обработка, структура наплавленного металла, твердость, основность сварочного флюса, металлографическое исследование, дефекты наплавленного металла.

G.E. Trekin, O.I. Shevchenko

Nizhny Tagils Technology Institute, Department of Ural Federal University
name after the first President of Russia B.N. Eltsin, Nizhny Tagil, Russian Federation

FORMATION ADDITIVE METAL PIECE BY MEANS OF SUBMERGED ARC WELDING

In this article considered formation of the geometrical shape and structure of the deposited metal during additive submerged arc weld-cladding by using wire (3 mm diameter) having low-alloyed composition and medium carbon content along with fluxes of different basicity. Also investigated changes in the chemical composition and hardness along deposited metal. Was explored ratio and size distribution for non-metallic inclusions located in the center of weld bead. Was determined that by multi layer flat positions submerged arc weld-cladding on conventional parameters forms vertical wall about 18 mm thick with rippled sides. Because dilution is very large, from previous layer remains 1 mm thick strip, which completely located in heat affected zone and exposed auto self thermal cycling treatment (short heat-cooling cycles, whose max temperature reduced from pre-melting to low-tempering). It lead to formation more relatively hard last deposited layer, which has ferrite-martensite structure, and relatively soft previously deposited layers, which have ferrite-pearlite structure. The biggest ratio and size of non-metallic inclusions was observed in metal, deposited under acid flux, much smaller are this parameters for neutral and basic fluxes. Size distribution non-metallic inclusions shows max ratio for less 1 мкм^2 particles after deposition under neutral and basic fluxes. Chemical composition deposited metal is about in weight %: 0,13 ~ C; Mn ~ 2; Si ~ 1; Cr ~ 1 for acidic and neutral fluxes and 0,20 ~ C; Mn ~ 1; Si ~ 1; Cr ~ 1 for basic flux. In conclusion was given recommendations for technology improvement and flux selection.

Keywords: additive technologies, submerged arc weld-cladding, formation weld-deposited, metal non-metallic inclusions, chemical composition of metal, auto self thermal cycling treatment, structure of deposited metal, hardness, basicity of a welding flux, optical microscopy investigation, defects of deposited metal.

Применение дуговой наплавки в аддитивных технологиях [1–9] для изготовления заготовок по-

лучает все большее развитие по мере удешевления робототехнических комплексов, способных выполнять сварку и наплавку. Наплавка под флюсом, несомненно, займет свою нишу в аддитивных тех-

нологиях из-за высокой производительности и высокого качества наплавленного металла. Ввиду этого актуально изучить формирование заготовки, полученной наплавкой под флюсом, ее структуру и свойства. Анализ литературных источников показал, что свойства и структура материалов, получаемых в аддитивных технологиях с применением дуговой сварки под флюсом, исследованы незначительно. Исходя из этого в работе поставлена цель – исследовать заготовку, полученную многослойной наплавкой проволоки Нп-30ХГСА под различными флюсами.

Наплавка производилась на установке АДЦ -1250 СФ проволокой 30ХГСА диаметром 3 мм на типовых режимах под флюсами АН 348 А, ФСА ЧТА 650-20/80 и UF-01 (табл. 1–3), количество проходов – 51, в качестве основного металла использовалась планка из стали 10Г2 толщиной 20 мм. Исследование химического состава наплавленного металла выполнено на приборе Q2-ION, приготовление шлифов выполнялось по общепринятым методикам, травление – в 6%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте [10–12], металлографическое ис-

следование и цифровая обработка изображений – на микроскопе ZEISS AXIO Observer D1m, оснащенный аппаратно-программным комплексом ТНХОМЕТ, дюрOMETрическое исследование – на твердомере DURA Jet по методу Роквелла.

Формирование единичного наплавленного валика и отделимость шлаковой корки для всех флюсов отличные. Форма единичного валика месяцеобразная с неглубоким зубом проплавления в середине. После наплавки последовательно одного валика на другой формируется вертикальная стенка высотой 60–65 мм и шириной 14–18 мм без трещин. Из-за низкой вязкости жидкого металла под слоем флюса происходит приращение тонкого слоя толщиной около 1 мм. Предыдущий валик переплавляется на 74 %, и от него остается тонкая прослойка толщиной также около 1 мм, которая попадает полностью в зону термического влияния и подвергается короткому термическому воздействию. При наплавке последующих слоев происходит автотермоциклическая обработка (АТЦО) короткими нагревами с убывающей максимальной температурой от предплавления до низкого отпуска (рис. 1).

Таблица 1

Химический состав (мас. %) и индекс основности B_{Φ} флюса АН-348А

SiO ₂	MnO	MgO	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S	P	B_{Φ}
41–44	34–38	5–7,5	4–5,5	<6,5	<4,5	<2	<0,15	<0,12	0,75

Таблица 2

Химический состав (мас. %) и индекс основности B_{Φ} флюса ФСА ЧТА 650-20/80

Al ₂ O ₃ + CaO + MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	B_{Φ}
>40	>20	>22	1,2

Таблица 3

Химический состав (мас. %) и индекс основности B_{Φ} флюса UF-01

CaO + MgO + CaF ₂ + MnO	SiO ₂	CaF ₂	B_{Φ}
>50	>20	>15	3,2

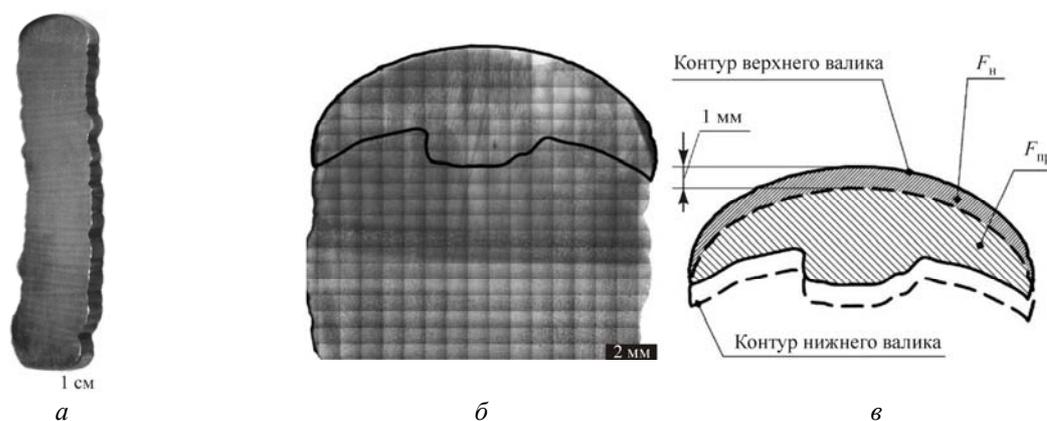


Рис. 1. Формирование заготовки при аддитивном изготовлении наплавкой: а – поперечное сечение; б – верхняя часть; в – схема проплавления между слоями; $F_{\text{пр}}$ – площадь проплавления; $F_{\text{н}}$ – площадь усиления

Распределение химических элементов по высоте наплавленного металла равномерное (рис. 2). При наплавке под флюсами АН-348А и ФСА ЧТА 650-20/80 остается около 40 % углерода, изначально содержащегося в проволоке, и около 60 % под флюсом UF-01. Наплавка под всеми флюсами приводит к незначительному насыщению наплавленного металла кремнием. Значительное насыщение марганцем происходит только под флюсами АН-348А и ФСА ЧТА 650-20/80 – на 1,5 и 0,79 % соответственно, для флюса UF-01 оно незначительно и составляет около 0,2 %. Выгорание хрома наблюдается только для флюса АН-348А (табл. 4). При наплавке под флюсами АН-348А и ФСА ЧТА 650-20/80 формируется химический состав типа 13Г2СХ, а под флюсом UF-01 типа 20ГСХ.

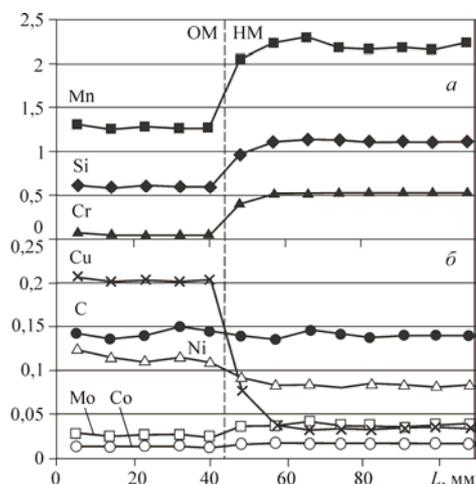


Рис. 2. Распределение химического состава (мас. %) по высоте L основного и наплавленного металлов (флюс АН-348А): ОМ – основной металл; НМ – наплавленный металл; a – в диапазоне до 2,5 %; b – в диапазоне до 0,25 %

Анализ распределения твердости по высоте наплавленного металла показал, что верхние валики имеют более высокую на 16–32 % твердость по

сравнению с низлежащими, прошедшими автотермоциклическую обработку (рис. 3, см. табл. 4).

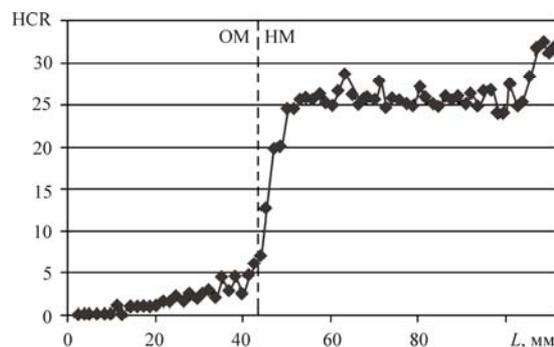


Рис. 3. Распределение твердости HRC по высоте L основного и наплавленного металлов (флюс АН-348А): ОМ – основной металл; НМ – наплавленный металл

Анализ структуры выявил в верхних валиках мартенситно-ферритную структуру с небольшой объемной долей феррита для всех исследованных вариантов наплавки, что и обусловило более высокую твердость верхней части наплавленного образца. В низлежащих областях наплавки возросла доля феррита и произошло, вероятнее всего, образование дисперсного перлита после высокотемпературного термоциклического воздействия. Наибольшей дисперсностью обладает структура металла, наплавленного под флюсом ФСА ЧТА 650-20/80 (рис. 4).

Оценка неметаллических включений производилась на маленьком ($\times 50$) и большом ($\times 1000$) увеличении. В первом случае отмечается загрязненность относительно крупными включениями, которые образуются преимущественно на этапе взаимодействия гидродинамических течений металла и шлака в сварочной ванне. Вторые зарождаются в жидком и твердом состояниях, а растут или растворяются преимущественно в твердом состоянии. Форма частиц преимущественно сферическая (рис. 5).

Таблица 4

Химический состав и твердость наплавочной проволоки и наплавленного металла (НМ)

Флюс	Содержание элементов, мас. %				Твердость НМ HRC после:	
	C	Si	Mn	Cr	наплавки	наплавки и АТЦО
Проволока 30ХГСА	0,34	0,97	0,81	0,75	–	–
АН-348 А	0,13	1,15	2,31	0,56	31	26
ФСА ЧТА 650-20/80	0,14	1,20	1,59	0,72	31	21
UF-01	0,21	1,04	1,02	0,79	26	19

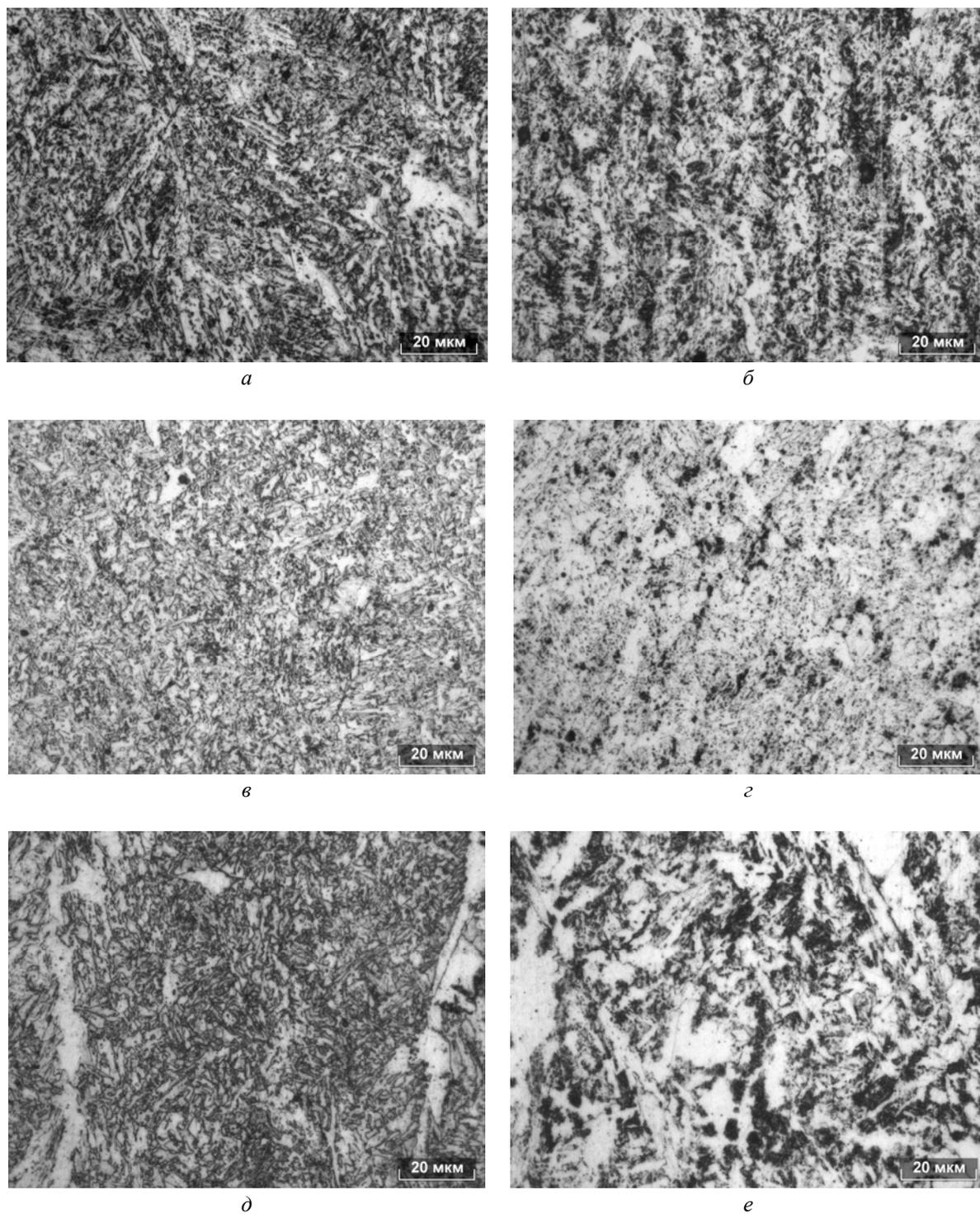
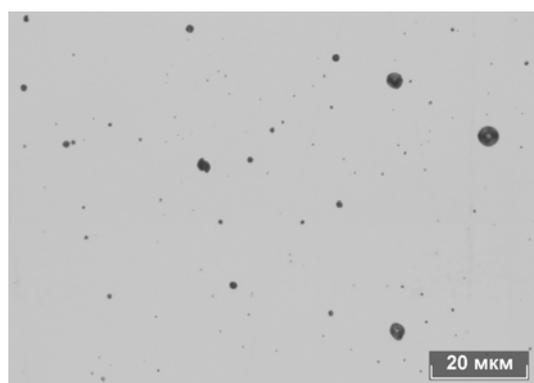
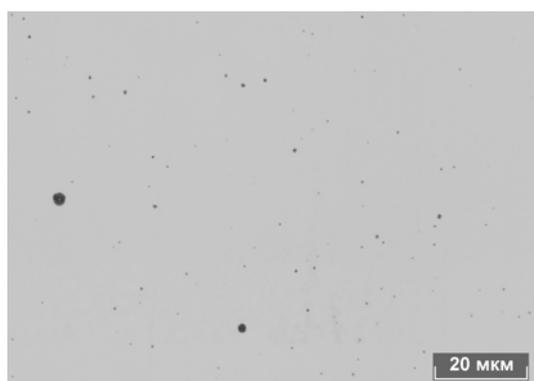


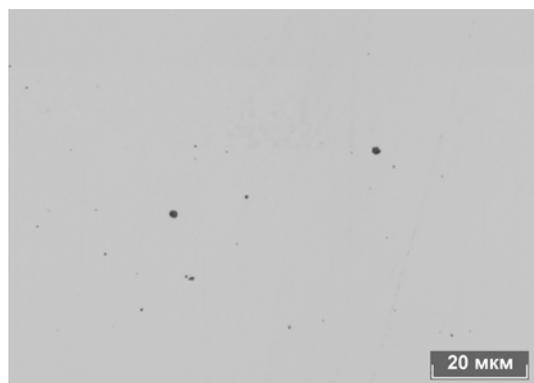
Рис. 4. Микроструктура наплавленного металла. Наплавка под флюсом: *а, б* – АН-348А; *в, г* – ФСА ЧТА 650-20/80; *д, е* – UF-01; *а, в, д* – после наплавки; *б, г, е* – после наплавки и автотермоциклического воздействия



а



б



в

Рис. 5. Неметаллические включения в наплавленном металле (нетравленный шлиф). Наплавка под флюсом: а – АН-348А; б – ФСА ЧТА 650-20/80; в – UF-01

Наибольшая объемная доля включений при наплавке под флюсом АН 348-А связана с высокой насыщенностью металла шва кислородом. Для флюсов ФСА ЧТА 650-20/80 и UF-01 эта величина меньше (рис. 6). Высокая доля крупных включений, попавших в сечение шлифа (размером от 30 до 910 мкм²), вероятнее всего, более затрудненных условий всплывания неметаллических включений при использованных режимах для флюсов АН 348-А и ФСА ЧТА 650-20/80 по сравнению с флюсом UF-01 (рис. 7, а, в, д). При большом увеличении наибольшая доля мелких, до 1 мкм², включений – для

флюсов ФСА ЧТА 650-20/80 и UF-01 и значительная доля включений размером от 1,5 до 18 мкм² (рис. 7, б, з, е) связана с различиями в температуре плавления флюсов. Интервал плавления сварочных флюсов сильно влияет на количество и вид микрошлаковых включений, остающихся в металле шва. Компоненты сварочного флюса, имеющие температуру затвердевания более высокую, чем металл шва, присутствуют в жидком металле сварочной ванны в виде мельчайших сферических частиц и успевают удалиться из ванны до ее кристаллизации. Кислые и нейтральные флюсы имеют температуру плавления около 1350–1450 °С, поэтому количество микрошлаковых частиц в металле шва больше, чем при использовании основных флюсов.

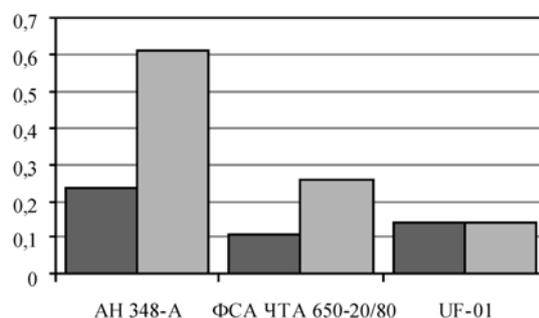


Рис. 6. Доля неметаллических включений (об. %) в наплавленном металле при увеличении: ■ – ×50; □ – ×1000

Формирование контура проплавления не совсем благоприятно при наплавке под всеми рассмотренными флюсами, поскольку формируется зуб проплавления, что может повысить вероятность образования межслойных трещин. Исходя из этого необходимо добиться контура проплавления, приближающегося к прямой линии без центрального участка глубокого проплавления. Этого можно добиться за счет применения электромагнитных воздействий [13–16], наплавки модулированным током [17–23], иных технологических воздействий и изменения режимов наплавки. Доля относительно крупных включений площадью более 300 мкм², если принять частицы сферическими, то размером более 19,5 мкм, составляет 0,079 для АН-348А; 0,095 – для ФСА ЧТА 650-20/80 и 0,074 – для UF-01. Это показывает, что уровень содержания условно крупных неметаллических включений несколько больший для ФСА ЧТА 650-20/80, но в целом значения одного порядка, поэтому выделить лучший флюс по этому параметру затруднительно. Анализ размеров частиц, выявленных на большом увеличении, показывает, что их размеры меньше опасного размера в 10–20 мкм (38,5–78,5 мкм²),

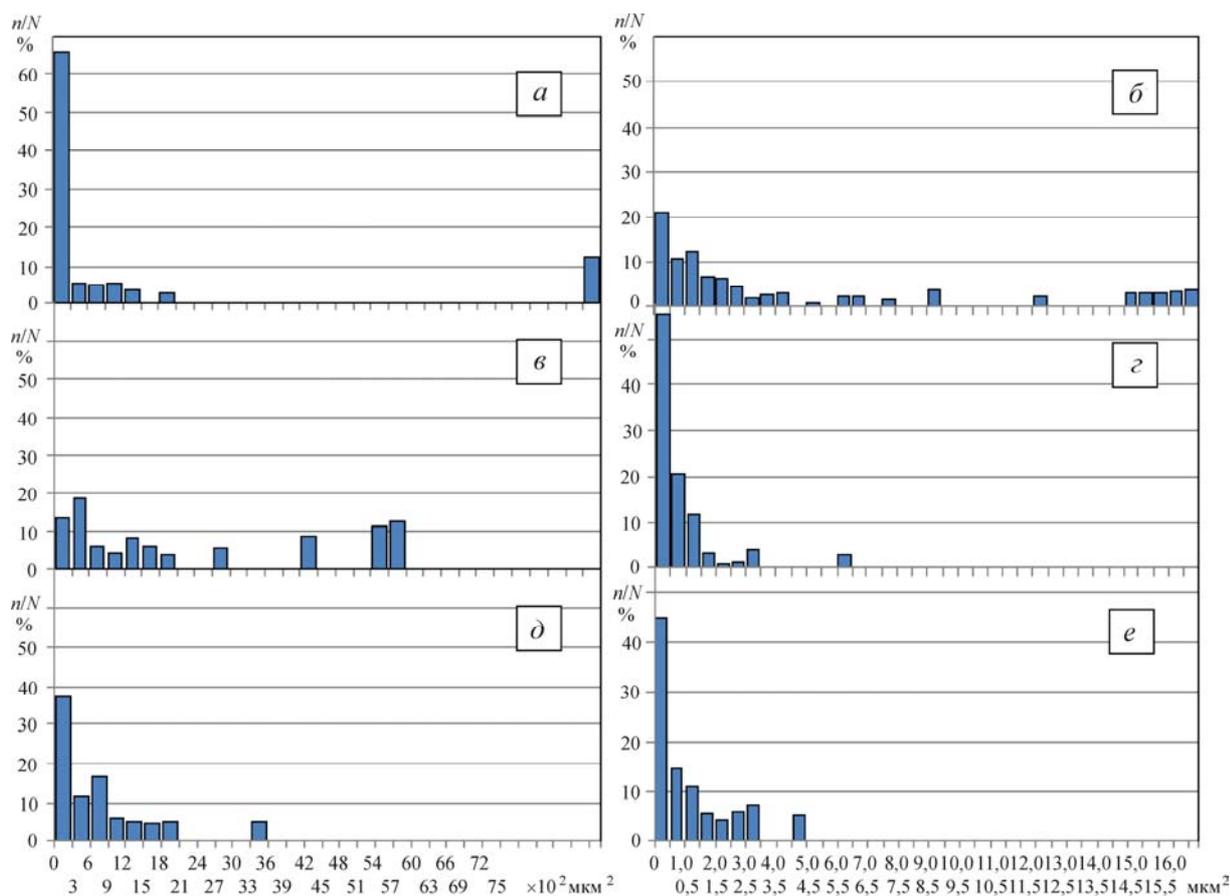


Рис. 7. Гистограммы распределения неметаллических включений по площади в наплавленном металле. Наплавка под флюсом: а, б – АН-348А; в, з – ФСА ЧТА 650-20/80; д, е – UF-01 при увеличении: а, в, д – $\times 50$; б, з, е – $\times 1000$

определенного в работах [24, 25], для всех использованных флюсов, но их плотность в металле, наплавленном под флюсом АН 348А, в разы больше, чем при применении двух других флюсов. Наиболее благоприятной принято считать дисперсную структуру с приемлемым количеством неметаллических включений. Этому критерию в наибольшей степени подходит флюс ФСА ЧТА 650-20/80.

Таким образом, при аддитивном изготовлении заготовки наплавкой под флюсом проволокой диаметром 3 мм на типовых режимах формируется стенка толщиной 14–18 мм. При использовании проволоки 30ХГСА под слоем флюсов АН-348А и ФСА ЧТА 650-20/80 формируется химический состав типа 13Г2СХ, а под флюсом UF-01 – типа 20ГСХ. Наплавленный металл имеет мартенситно-ферритную структуру после наплавки, которая обуславливает более высокую твердость верхних валков. В нижерасположенных слоях наплавленного металла формируется твердость от 19 до 26 HRC, которая обусловлена ростом доли феррита, образованием дисперсного перлита и отпуском мартенсита из-за автотермоциклической обработки. Наибольшую загрязненность неметаллическими включениями имеет металл, наплавленный под

флюсом АН-348А, наименьшую – под UF-01. По результатам исследований к применению можно рекомендовать флюс ФСА ЧТА 650-20/80. Также необходимо усовершенствовать технологию наплавки, чтобы убрать зуб проплавления в центре валика.

Список литературы

1. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / НАМИ. – М., 2015. – 220 с.
2. Довбыш В.М., Забеднов П.В., Зленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла // Библиотечка литейщика. – 2014. – № 9. – С. 14–71.
3. Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий (обзор) / В.Н. Коржик, В.Ю. Хаскин, А.А. Гринюк [и др.] // Автоматическая сварка. – 2016. – № 5–6. – С. 127–134.
4. Григорьев С.Н., Смуров И.Ю. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // Инновации. – 2013. – № 10(180). – С. 76–82.
5. Wire and arc additive manufacturing / S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove // Materials Sci. and Techn. – 2016. – Vol. 32, no. 7. – P. 641.

6. Colegrove P., Williams S. High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology / Cranfield University. – 2013. – URL: <https://xyzist.com/wp-content/uploads/2013/12/Paul-Colegrove-Cranfield-Additive-manufacturing.pdf> (accessed 01.05.2017).
7. Clark D., Bache M.R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications // J. of Materials Proc. Techn. – 2008. – No. 203. – P. 439–448.
8. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А.А. Осколков, Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 90–104.
9. Формирование структуры и свойств стали 04X18H9 при аддитивном производстве заготовок / Ю.Д. Щицын, С.А. Терентьев, С.Д. Неулыбин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 55–62.
10. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: справ. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.
11. Способы металлографического травления: справ. / пер. с нем. М. Беккерт, Х. Клемм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 400 с.
12. Вашуль Х. Практическая металлография. – М.: Металлургия, 1988. – 320 с.
13. Померанцев А.С. Повышение производительности автоматической однопроходной дуговой сварки под флюсом стыковых соединений из низколегированных сталей в переменном (50 Гц) магнитном поле: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ДГТУ. – Ростов на/Д, 2003. – 17 с.
14. Шевченко О.И., Трекин Г.Е. Структура и свойства покрытий при электромагнитном воздействии на сварочную ванну // Актуальные проблемы физического материаловедения сталей и сплавов: XIX Урал. шк. металлургов-термистов, посвященная 100-летию со дня рождения академика В.Д. Садовского, г. Екатеринбург, 4–8 февраля 2008 г. / УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 2008. – С. 234.
15. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В.П. Черныш, В.Д. Кузнецов, А.Н. Брикман [и др.]; под общ. ред. В.П. Черныша. – Киев: Техніка, 1983. – 127 с.
16. Черныш В.П., Кухарь С.Н. Оборудование для сварки с электромагнитным перемешиванием. – Киев: Виша школа, 1984. – 56 с.
17. Меркулов Б.А., Зубченко А.С., Иванов А.М. Энергетические характеристики процесса и особенности термического цикла при сварке пульсирующей дугой под флюсом // Сварочное производство. – 1989. – № 9. – С. 18–23.
18. Технология ручной дуговой сварки покрытыми электродами с модуляцией параметров режима / Д.А. Дудко, В.С. Сидорук, С.А. Зацерковский [и др.] // Автоматическая сварка. – 1991. – № 12. – С. 59–60.
19. Шигаев Т.Г. Сварка модулированным током // Итоги науки и техники. Т. 17. Сварка. – М., 1985. – С. 91–133.
20. Дюгеров Н.Г., Сагиров Х.Н., Ленивкин В.А. Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 80 с.
21. Сараев Ю.П. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. – Новосибирск: Наука, 1994. – 109 с.
22. Патон Б.Е., Потапьевский А.Г., Подола Н.В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса // Автоматическая сварка. – 1964. – № 1. – С. 1–6.
23. Зависимость химического состава металла шва от параметров режима дуговой сварки модулированным током // Д.А. Дудко, С.А. Зацерковский, В.С. Сидорук [и др.] // Автоматическая сварка. – 1989. – № 2. – С. 27–29.
24. Кривонос Е.А., Белинин Д.С. Трансформация неметаллических включений в сталях под действием плазменного источника нагрева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 1. – С. 58–77.
25. Кривонос Е.А. Особенности влияния неметаллических фаз на развитие деформации наплавленных слоев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 1. – С. 189–204.

References

1. Zlenko M.A., Nagaitsev M.V., Dovbysh V.M. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii: posobie dlia inzhenerov [Additive Technology in Machine Building: A Guide for Engineers]. Moscow: GNTs RF FGUP «NAMI», 2015, 220 p.
2. Dovbysh V.M., Zbednov P.V., Zlenko M.A. Additivnye tekhnologii i izdeliia iz metalla [Additive technologies and metal products]. *Bibliotekha liteishchika*, 2014, no. 9, pp. 14–71.
3. Korzhik V.N., Khaskin V.Iu., Griniuk A.A. at al. Trekhmernaiia pechat' metallicheskih ob'emnykh izdelii slozhnoi formy na osnove svarochnykh plazmenno-dugovykh tekhnologii (obzor) [Three-dimensional printing of metal volume products of complex shapes on the basis of plasma-arc welding technologies (review)]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 2016, no. 5-6, pp. 127–134.
4. Grigor'ev S.N., Smurov I.Iu. Perspektivy razvitiia innovatsionnogo additivnogo proizvodstva v Rossii i za rubezhom [Prospects for the development of innovative additive manufacturing in Russia and abroad]. *Innovatsii*, 2013, no. 10 (180), pp. 76–82.
5. Williams S.W., Martina F., Addison A.C. at al. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*. 2015, pp. 1–7.
6. Colegrove P., Williams S. Colegrove P. High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology [Elektronnyi resurs]. Cranfield University, 2013, available at: <https://xyzist.com/wp-content/uploads/2013/12/Paul-Colegrove-Cranfield-Additive-manufacturing.pdf> (accessed 01 May 2017).
7. Clark D., Bache M. R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applica-

tions. *Journal of materials processing technology*, 2008, no. 203, pp. 439–448.

8. Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I. i dr. *Peredovye tekhnologii additivnogo proizvodstva metallicheskih izdelii* [Advanced technologies for additive manufacturing of metal products]. *VESTNIK PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* 2018, vol. 20, no. 3, pp. 90–104.

9. Shchitsyn Iu.D., Terent'ev S.A., Neulybin S.D. et al. *Formirovanie struktury i svoystv stali 04Kh18N9 pri additivnom proizvodstve zagotovok* [Formation of structure and properties of steel 04X18H9 at additive production of billets]. *VESTNIK PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* 2018, vol. 20, no. 3, pp. 55–62.

10. *Metallograficheskie reaktiv* [Metallographic reagents]. Ed. Kovalenko V.S. 3rd. Moscow: Metallurgiya, 1981, 120 p.

11. *Sposoby metallograficheskogo travleniia* [Methods of metallographic etching]. Ed. Bekkert M, Klemm Kh. 2nd. Moscow: Metallurgiya, 1988, 400 p.

12. *Vashul' Kh. Prakticheskaiia metallografiia*. M.: Metalluriiia, 1988. 320 p.

13. Pomerantsev A.S. *Povyshenie proizvoditel'nosti avtomaticheskoi odnoprokhodnoi dugovoi svarki pod flui-som stykovykh soedinenii iz nizkolegirovannykh staley v peregennom (50 Gts) magnitnom pole* [Increase of productivity of automatic single-pass submerged-arc welding of butt joints made of low-alloy steels in alternating (50 Hz) magnetic field]. Ph.D. thesis. Rostov na Donu, DGTU, 2003 17 p.

14. Shevchenko O.I., Trekin G.E. *Struktura i svoystva pokrytii pri elektromagnitnom vozdeistvii na svarochnuuu vannu* [Structure and properties of coatings under electromagnetic influence on the welding bath]. *XIX Ural'skaia shkola metallovedov-termistov. Aktual'nye problemy fizicheskogo metallovedeniia staley i splavov, posviashchennaia 100-letiiu so dnia rozhdeniia akademika. sbornik materialov*, Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2008, p. 234.

15. Chernysh V.P., Kuznetsov V.D., Briksman A.N. et al. *Svarka s elektromagnitnym peremeshivaniem* [Electromagnetic stir welding]. Ed. V.P. Chernysha. Kiev: Tekhnika, 1983, 127 p.

16. Chernysh V.P., Kukhar' S.N. *Oborudovanie dlia svarki s elektromagnitnym peremeshivaniem* [Electromagnetic stir welding equipment]. Kiev: Izdatel'stvo pri Kievskom gos. universitete izd-go ob"edineniia «Visha shkola», 1984, 56 p.

17. Merkulov B.A., Zubchenko A.S., Ivanov A.M. *Energeticheskie kharakteristiki protsessa i osobennosti termicheskogo tsikla pri svarke pul'siruiushchei dugoi pod flui-som* [Energy characteristics of the process and features of the thermal cycle in submerged arc welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1989, no. 9, pp. 18–23.

18. Dudko D.A., Sidoruk V.S., Zatserkovskii S.A. i dr. *Tekhnologiiia ruchnoi dugovoi svarki pokrytymi elektrodami s moduliatsei parametrov rezhima* [Manual arc welding with coated electrodes with modulated mode parameters]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 1991, no. 12, 1991, pp. 59–60.

19. Shigaev T.G. *Svarka modulirovannym tokom* [Current modulated welding]. *Itogi nauki i tekhniki*, 1985, vol.17. Svarka. Moscow, pp. 91–133.

20. Diugerov N.G., Sagirov Kh.N., Lenivkin V.A. *Oborudovanie dlia impul'sno-dugovoi svarki plaviashchim-*

sia elektrodom [Equipment for pulse arc welding with melting electrode]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 80 p.

21. Saraev Iu.P. *Impul'snye tekhnologicheskie protsessy svarki i naplavki* [Impulse welding and surfacing processes]. Novosibirsk. Nauka, 1994, 109 p.

22. Paton B.E., Potap'evskii A.G., Podola N.V. *Impul'sno-dugovaia svarka plaviashchimsia elektrodom s programmym regulirovaniem protsessa* [Pulse-arc welding with melting electrode with programmable process control]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 1964, no. 1, pp. 1–6.

23. Dudko D.A., Zatserkovskii S.A., Sidoruk V.S. i dr. *Zavisimost' khimicheskogo sostava metalla shva ot parametrov rezhima dugovoi svarki modulirovannym tokom* [Dependence of weld metal chemistry on modulated current arc welding parameters]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 1989, no. 2, pp. 27–29.

24. Krivonosova E.A., Belinin D.S., Krivonosova E.A. *Transformatsiia nemetallicheskih vklucheniia v staliakh pod deistviem plazmennogo istochnika nagreva* [Transformation of non-metallic inclusions in steels under the influence of plasma heating source]. *VESTNIK PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* 2017, vol. 19, no. 1, pp. 58–77.

25. Krivonosova E.A. *Osobennosti vliianiia nemetallicheskih faz na razvitie deformatsii naplavlennykh sloev* [Peculiarities of the influence of non-metallic phases on the development of deformation of welded layers]. *VESTNIK PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 189–204.

Получено 27.06.19

Опубликовано 26.11.19

Сведения об авторах

Трекин Григорий Евгеньевич (Нижний Тагил, Россия) – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник центра научных исследований и инноваций Нижнетагильского технологического института, филиала Уральского федерального университета им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: trekin1963@yandex.ru.

Шевченко Олег Игоревич (Нижний Тагил, Россия) – доктор технических наук, доцент, завкафедрой металлургической технологии Нижнетагильского технологического института, филиала Уральского федерального университета им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: shevchenko_oleg@mail.ru.

About the authors

Grigoriy E. Trekin (Nizhny Tagil, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Reseacher, Center for Research and Innovation, Nizhny Tagils Technology Institute, Department of Ural Federal University named after the first President Russia B.N. Eltsin; e-mail: trekin1963@yandex.ru.

Oleg I. Shevchenko (Nizhny Tagil, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department Metallurgical Technologies, Nizhny Tagils Technology Institute, Department of Ural Federal University named after the first President Russia B.N. Eltsin; e-mail: shevchenko_oleg@mail.ru.