

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-67-80

^{1,*}Жабрев Л.А., ²Чуппина С.В., ¹Шамиурин А.И., ³Лебедева Е.А., ¹Панченко О.В.¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого²ООО «Группа НМП» – управляющая организация АО «Нева Металл Посуда»³ООО «Завод ВДМ «Пигмент»

*E-mail: leozhabrev@spbstu.ru

ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ ПОКРЫТИЙ К ОБРАЗОВАНИЮ ПОР И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СВАРНОМ ШВЕ

Аннотация. Задача сварки стальных элементов, окрашенных различными покрытиями, встречается в целом ряде отраслей промышленности на этапах заводской сборки и монтажа крупногабаритных конструкций, а также в ходе ремонтно-восстановительных работ. Пористость сварного металла является наиболее распространенным дефектом при электродуговой сварке без удаления покрытия, а склонность к порообразованию является нормируемым параметром при аттестации межоперационных грунтовок (EN ISO 17652-2:2003). Проведенные исследования охватывают широко распространённые полиакрилатные, алкидные, эпоксидные, поливинилбутиральные грунтовки в расширенном диапазоне рабочих толщин. Методика оценки также использована для цинкнаполненных и органосиликатных защитных покрытий. На основе исследования состава неметаллических включений в наплавленном металле методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и с помощью растрового электронного микроскопа описаны особенности поведения продуктов деструкции покрытий и их производных в ходе протекающих физико-химических превращений в процессе сварки. Проведено обобщение технологических особенностей сварки по покрытиям: стабильности параметров режима, стойкости к разбрызгиванию металла и активности выгорания покрытий в областях, прилегающих к валику.

Ключевые слова: пористость, неметаллические включения, высокотемпературная деструкция, органосиликатные покрытия, межоперационные грунтовки, цинкнаполненные покрытия

Введение. На протяжении нескольких веков сталь остается наиболее распространенным и востребованным конструкционным материалом, а коррозия металла является глобальной проблемой для всех отраслей промышленности. На практике решение данного вопроса широко реализуется с помощью антикоррозионной защиты разнообразными покрытиями (Пк). В ряде отраслей промышленности (судо- и мостостроении, атомной и теплоэнергетике, производстве железобетонных изделий и т.д.) технология защиты стальных деталей и конструкций соседствует с необходимостью проведения сборочных, монтажных, ремонтно-восстановительных работ, выполняемых электродуговой сваркой [1–3]. С одной стороны, использование неснимаемых перед сваркой Пк (в англоязычной литературе – «weldable», т.е. способных к сварке) значительно ускоряет и упрощает процесс подготовки элементов конструкции под сборку и сварку. С другой – продукты разрушения Пк снижают стабильность горения электрической дуги, способствуют увеличению разбрызгивания металла и пористости шва, а летучие продукты разложения способны нанести вред здоровью сварщика [4, 5]. При несоблюдении технологии сварки избыточная пористость сварного шва приводит к снижению прочностных и пластических характеристик, что

вызывает ослабление конструкции, особенно при наличии растягивающих напряжений [6].

По функциональным задачам и продолжительности срока службы исследуемые материалы можно разделить на межоперационные грунтовки и защитные Пк. Первые обычно наносятся слоем от 10 до 30 мкм и используются для антикоррозионной защиты заготовок в процессе транспортировки, складирования и сборки в течение срока от трех до девяти месяцев [7]. Они могут использоваться в качестве грунтовоочного слоя в комплексной защите металла или быть удалены перед окончательной окраской одним из следующих методов: механическим, абразивно-водоструйным [8–10], химическим [11] или лазером [12]. При удалении грунтовки любым из методов требуются дополнительные финансовые и временные затраты, но даже в этом случае использование межоперационных грунтовок экономически выгоднее, чем удаление ржавчины. Аттестация грунтовок для проведения сварки и резки (газопламенной, плазменной, лазерной) без их полной очистки регламентируется международными и национальными нормативными документами (например, в судостроении – требованиями Российского морского регистра судоходства).

Среди наиболее востребованных межоперационных грунтовок следует выделить полиакрилатные, алкидные, эпоксидные и поливинилбутиральные. В различных источниках [4, 13–18] приведены сведения о возможности проведения сварочных работ с использованием Пк на основе вышперечисленных полимеров и целого ряда наполнителей: оксида железа, фосфата цинка, цинка в различных модификациях и др.

Защитные Пк наносят слоем значительно большей толщины, и они, как правило, выполняют сразу ряд функций: адгезионную к подложке, барьерную антикоррозионную, покрывную, декоративную или функциональную. Срок их службы в зависимости от условий эксплуатации может достигать пяти и более лет. Одними из наиболее востребованных Пк, которые используются, например, для защиты крупногабаритных мостовых конструкций, являются обладающие высокими барьерными свойствами цинкнаполненные Пк. Рабочие толщины Пк составляют 40–120 мкм, а при необходимости их можно дополнительно перекрыть другими материалами.

Поведение органосиликатных покрытий (ОСПк) на основе полиорганосилоксанов и гидросиликатов в ходе сварки вызывает значительный интерес ввиду их высокой теплостойкости (длительно 300–600 °С, кратковременно до 1200 °С), значительно превышающей температуру их формирования и температуру начала деструкции кремнийорганического пленкообразователя [19, 20]. В зависимости от условий эксплуатации и марки ОСПк рекомендовано наносить слоем 100–200 мкм, однако, в ряде случаев в заводских условиях наносят слой толщиной 50–80 мкм, а финишная окраска производится после монтажа конструкции. Данные о возможности проведения электросварки без предварительного удаления ОСПк неоднократно в своих работах приводил крупный специалист в области органосиликатных материалов – Н.П. Харитонов. Ограничений на проведение электродуговой сварки покрытыми электродами не накладывалось и считалось, что при температуре плавления металла (стали) ОСПк плавятся и переходят в шлак, не образуя включений в шве [21].

Электродуговая сварка вызывает в зоне сварного шва преимущественно пиролиз Пк на основе углеводородных и кремнийорганических связующих и последующее испарение продуктов деструкции, основными из которых являются водород, пары воды, углекислый газ, реже азот и газообразные соединения на основе оксидов различных металлов [22]. Поры образуются в результате значительного снижения растворимости газов (в первую очередь водорода, азота и монооксида углерода), распределяемых в сварочной

ванне во время ее затвердевания. Другие газы, в том числе прочие летучие продукты разрушения Пк (например, метан, бензол, формальдегид, циклосилоксаны в случае ОСПк и др.), не играют значительной роли в порообразовании [22, 23]. Жидкий металл сварочной ванны разогревается в среднем до 1600–1800 °С, а в расплавленных электрической дугой каплях электродного металла и в передней части ванны достигаются температуры около 2300 °С. При данных температурах перегретый металл, взаимодействуя с активированными дугой газами, может абсорбировать их в количествах, значительно превышающих обычную растворимость в твердом металле. При последующем охлаждении жидкого металла растворимость газов снижается, и достигается переизбыток газами сварочной ванны во всем ее объеме.

Традиционно для выполнения качественного шва требуется, чтобы нежелательные продукты деструкции из защитного Пк в достаточной мере удалялись из зоны сварки с помощью одного или нескольких из следующих процессов [1]:

- 1) выгорание Пк на переднем крае сварочной ванны;
- 2) дегазация летучих продуктов разрушения Пк из жидкой сварочной ванны;
- 3) рафинирование металла шва за счет выведения продуктов разрушения Пк в шлак.

При невозможности полного удаления оставшиеся продукты разрушения Пк должны быть связаны в устойчивые соединения элементами-раскислителями из основного и присадочного металла.

Многообразие природы полимер-органической основы и химического состава наполнителей и пигментов дополнительно осложняет междисциплинарный характер поднимаемого вопроса, а оценка соотношения преимуществ и недостатков технологии применительно к каждой марке Пк индивидуальна. Более того, технологические параметры нанесения и сушки Пк [15], метод и режим дуговой сварки, конфигурация сварного соединения [24] и подготовка сварочных материалов [25] оказывают существенное влияние на возможность использования неснимаемого Пк в конкретной технологической цепочке.

Обобщая вышеизложенное, авторы стремятся единым методом исследования для всех заявленных материалов оценить склонность Пк к порообразованию при электродуговой сварке в защитном газе, а также установить природу неметаллических включений в металле шва и описать технологические особенности сварки по Пк.

Таблица 1

Состав покрытий, используемых в работе

Покрытие	Природа покрытия и назначение	Рекоменд. толщина, мкм	Растворитель	Полимерное связующее	Наполнители и пигменты	Соотношение Полимер / Наполнители + Пигменты
АК-070	хлороформная полиакрилатная грунтовка для улучшения адгезии поверхности к финишному покрытию	10–30	ксилол, бутанол, ацетон	карбамидо-формальдегидная смола; сополимер метакриловой кислоты и бутилового эфира метакриловой кислоты	SiCrO_4	78/22
ВЛ-023	механоупрочняющая грунтовка на основе поливинил-бутирала	15–18	спиртовой раствор орто-фосфорной кислоты	поливинилбутираль; смола формальдегидная	$\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_5]_2(\text{OH})_2$; $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; $\text{ZnCrO}_4 \cdot 4\text{Zn}(\text{OH})_2$; Cr_2O_3 ;	47/53
ГФ-021 Экспресс	алкидная глифталевая грунтовка для улучшения адгезии поверхности к финишному покрытию	15–40	ксилол	лак ПФ-060; фенолалькидная смола	$\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_5]_2(\text{OH})_2$; $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; CaCO_3 TiO_2 ; сажа	28/72
ЭпоксидКонт-0263 С	эпоксидная механоупрочняющая грунтовка	20–30	ксилол, бутанол, ацетон	эпоксидная смола на основе бисфенола А; смола фенолоформальдегидная	$\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_5]_2(\text{OH})_2$; Fe_2O_3 ; $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; $\text{ZnCrO}_4 \cdot 4\text{Zn}(\text{OH})_2$	34/66
ЭпоксидКонт Цинк	антикоррозионная цинксоляная система на основе эпоксидных смол с отвердителем эфирного типа	40–120	ксилол	диглицидиловый эфир бисфенола А	$\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_5]_2(\text{OH})_2$; Zn пыль; Zn хлопья; SiCrO_4 ; BaSO_4	19/81
ОС-51-03 зеленое	антикоррозионное, радиационностойкое, дезактивируемое ОСПк	150–200 (50–80)		Немодифицированный полидиметилфенилсилоксан	$\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_5]_2(\text{OH})_2$; $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; TiO_2 ; Cr_2O_3	55/45
ОС-51-03 серое					$\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_5]_2(\text{OH})_2$; $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; TiO_2 ; сажа	55/45
ОС-56-22 серое	антиоблудивительное ОСПк	150–200 (50–80)	толуол	немодифицированный полидиметилфенилсилоксан; линейный	$\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_5]_2(\text{OH})_2$; $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; TiO_2 ; ZnO ; BaSO_4 ; сажа	60/40
ОС-82-01 зеленое	термостойкое ОСПк	100–160 (50–80)		диметилсилоксан-с, о-диол модифицированный полидиметилфенилсилоксан*	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; Cr_2O_3	30/70

* Полимер лака модифицирован органическим полиэфиром № 315, который синтезируют из касторового масла, диэтиленгликоля, малеинового и фталевого ангидридов

Используемые покрытия и методы исследования. Составы, основное назначение и диапазон рекомендуемых толщин Пк, используемых в рамках исследования, представлены в таблице 1.

Пористость сварного шва, выполненного по Пк, определялась в соответствии с методикой EN ISO 17652-2:2003: Welding – Test for shop primers in relation to welding and allied processes – Part 2: Welding properties of shop primers. Методика заключается в создании нахлесточного сварного соединения, наиболее склонного к образованию пористости. Заготовки сварного соединения представляли собой пару стальных листов марки 20 размерами 12×50×200 и 20×80×200 мм, на лицевую сторону более толстого из листов валиком было нанесено Пк. АК-070, ВЛ-023, ГФ-021 Экспресс, ЭпоксиКоут-0263С, ЭпоксиКоут Цинк были нанесены в соответствии с НТД на данные материалы. Покрытия ОС-51-03 и ОС-56-22 отверждались при помощи введения 0,5 масс. % отвердителя АГМ-9 при комнатной температуре, а ОС-82-01 – способом горячего отверждения [20, 21]. Толщину сухого слоя Пк определяли (здесь и далее) при помощи толщиномера «Константа К6».

Сборка листов осуществлялась в специальных тисках, позволяющих производить сварку в нижнем положении («в лодочку», см. рис. 1). Сварка выполнялась (здесь и далее) с помощью роботизированного комплекса, включающего манипулятор Yaskawa Motoman MH24 и источник питания EWM AlphaQ 552, в среде углекислого газа с использованием сварочной проволоки Св08Г2С диаметром (d) 1,2 мм. Параметры сварки: сварочный ток (I) – 250±10 А; напряжение дуги (U) – 30±1 В; скорость сварки (V_{св}) – 30 см/мин; скорость подачи проволоки (V_п) – 9,0 м/мин. Угол наклона горелки к плоскости горизонта составлял 60° в направлении хода сварки, что также способствовало дополнительному увеличению пористости [6].

После завершения сварки концевые участки соединения: 60 мм от начала и 40 мм от конца образца, были отрезаны, оценка склонности Пк к порообразованию производилась на участке 100 мм. Полученные образцы были разрушены на стенде для механических испытаний Zwick/Roell Z100. Оценка пористости осуществлялась путем обработки фотографий излома при десятикратном увеличении; поры, наибольшая ось которых не превышала 0,5 мм, не учитывались в оценке.

Исследование состава продуктов разрушения Пк (и производных их взаимодействия с металлом), находящихся в сварном шве в виде неметаллических включений, проводилось на шлифах поперечных сечений наплавленных швов с помощью растрового электронного микроскопа

Tescan Mira3N и метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS) в соответствии с ISO 22309:2011 на детекторе Oxford Instruments X-max 80 EDX. Шлифы были вырезаны на расстоянии 80 мм от конца шва, выполненного по окрашенной стороне стального листа (марка Ст3сп) размерами 10×200×300 мм. Шов наплавлялся по центру листа вдоль стороны 300 мм на следующем режиме: сварочная проволока Св08Г2С, d – 1,2 мм; I – 220±10 А; U – 22 В; V_{св} – 30 см/мин; V_п – 6,5 м/мин; горелка располагалась перпендикулярно к подложке. В ходе данного эксперимента также оценивались технологические особенности сварки: стабильность процесса, склонность к разбрызгиванию, масса наплавленного металла, геометрические параметры наплавленного валика и ширина зоны выгорания Пк.

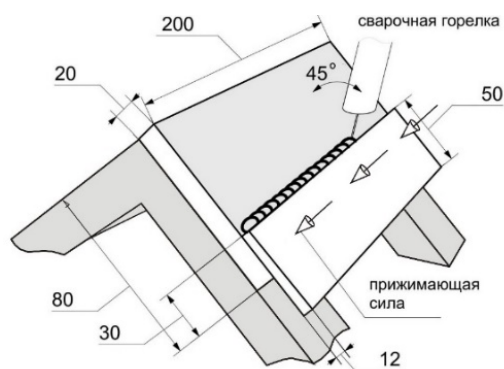


Рис. 1. Схема сборки и сварки образца для определения склонности покрытия к порообразованию

Результаты эксперимента и обсуждение.

Склонность к порообразованию. В таблице 2 для различных толщин Пк (δ) приведены значения общей площади пор ($S_{\text{пор}}$) и относительной пористости шва (Φ), равной отношению общей площади пор к площади излома шва. В соответствии с критерием методики по полученным результатам дано заключение о возможности использования исследуемых Пк в качестве не снимаемых перед сваркой:

- 1) при общей площади пор в изломе шва менее 150 мм² Пк может использоваться как неснимаемое без ограничений;
- 2) при общей площади пор в изломе шва 150–250 мм² Пк может использоваться в особых случаях для нетяжело нагруженных конструкций;
- 3) запрещается использование Пк при общей площади пор в изломе шва более 250 мм².

На рисунках 2 и 3 представлены графические зависимости относительной пористости в изломе шва от толщины сухого слоя грунтовок и защитных Пк.

Таблица 2

Влияние толщины сухого слоя покрытия на склонность к порообразованию

Покрытие	δ , мкм	$S_{пор}$, мм ²	Φ , %	Покрытие	δ , мкм	$S_{пор}$, мм ²	Φ , %
АК-070	10	5±2	0,3	ОС-51-03 зеленое	25	60±13	9,5
	20	85±18	11,0		36	103±21	12,2
	25	167±39	23,2		50	107±29	16,4
	40	264±48	32,7		75	82±17	14,3
ВЛ-023	15	122±15	17,8		100	233±65	26,7
	18	145±34	20,0		110	186±40	27,5
	20	214±42	24,4	150	169±47	23,8	
	25	233±107	28,5	200	574±150	66,1	
ГФ-021 Экспресс	22	256±51	33,0	ОС-51-03 серое	20	92±11	13,2
	35	275±30	33,5		50	137±19	19,7
	55	277±95	34,8		100	246±61	33,3
ЭпоксиКоут-0263С	17	66±8	6,4		150	442±122	52,7
	20	75±18	12,8	ОС-56-22 серое	25	139±30	18,8
	28	178±89	23,1		50	195±41	24,3
35	170±12	22,8	100		299±75	41,8	
ЭпоксиКоут Цинк	25	22±5	3,4		150	340±97	52,8
	40	40±18	6,4	ОС-82-01 зеленое	35	27±4	4,0
	60	19±2	3,3		65	160±42	22,4
	100	30±7	4,2		150	357±170	55,4
	120	44±5	6,5		250	571±145	62,5

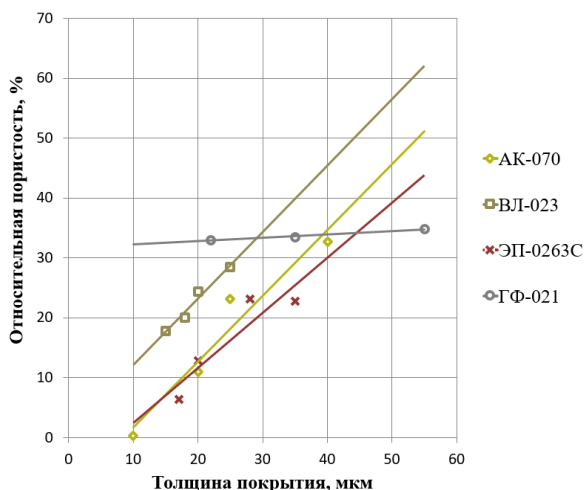


Рис. 2. Зависимость относительной площади пор в изломе сварного шва от толщины сухого слоя грунтовок

Для всех исследуемых Пк наблюдается рост пористости при увеличении толщины сухого слоя. Для грунтовок АК-070, ВЛ-023, ЭпоксиКоут-0263С на участке рабочих толщин наблюдается схожая линейная зависимость роста пористости от толщины сухого слоя Пк. Наименьшую склонность к образованию пор при равной толщине сухого слоя проявляют ЭпоксиКоут-0263С и АК-070. Возле нижней границы интервалов рекомендованных толщин (20–30 мкм для ЭпоксиКоут-0263С и 10–30 мкм для АК-070) допускается использовать грунтовки без ограничений, а на верхней границе интервала – в особых случаях для нетяжело нагруженных конструкций.

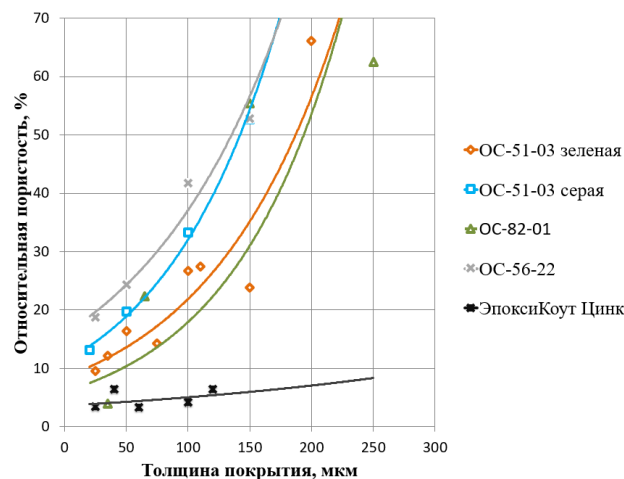


Рис. 3. Зависимость относительной площади пор в изломе сварного шва от толщины сухого слоя защитных покрытий

В узком интервале рабочих толщин ВЛ-023 15–18 мкм общая площадь пор не превышает 150 мм². Увеличение рекомендованной толщины сухого слоя даже до 20 мкм приводит к ограничениям в использовании ВЛ-023 в качестве неснимаемой межоперационной грунтовки.

В составе ГФ-021 Экспресс находится наибольшая доля наполнителей и пигментов среди всех исследуемых грунтовок: до четверти массы Пк составляет теплостойкий (900–1200 °С) и слаболетучий CaCO₃, в ходе термического разложения которого дополнительно образуются оксиды углерода, способствующие порообразованию. Использование грунтовки ГФ-021 Экспресс

не допускается во всем интервале рекомендованных толщин ввиду того, что общая площадь пор в изломе сварного соединения более 250 мм².

Различие почти в 600 °С между температурой плавления углеродистой стали (1500 °С) и температурой кипения цинка (906 °С), составляющего около четверти массы ЭпоксиКоут Цинк, приводит к активному образованию паров цинка в ходе сварки. В совокупности с невысокой теплостойкостью Пк порядка 220 °С это приводит к значительному выгоранию Пк и наименьшей пористости шва среди всех рассматриваемых материалов. Во всем интервале рекомендуемых толщин 40–120 мкм ЭпоксиКоут Цинк общая площадь пор не превышает 50 мм².

С температуры начала разрушения полимерной составляющей (от 240 °С и выше) и до достижения температур плавления стальной подложки в ОСПк может происходить целый ряд физико-химических процессов, которые относятся к одной из следующих групп [26]:

- 1) деструкция и «силоксановое структурирование» полиорганосилоксанов;
- 2) дегидроксилизация и другие структурные превращения гидросиликатов;
- 3) взаимодействие продуктов деструкции полиорганосилоксанов с силикатными и оксидными компонентами;
- 4) образование новых кристаллических фаз, переход материала в керамоподобное состояние.

В связи с высокими скоростями нагрева Пк при сварке (порядка 10² °С/с) процессы разрушения исходного слоя ОСПк заметно ускоряются, и деструкция и структурирование идут не только с поверхности ОСПк, а по всему объему материала, образуются новые аморфные более простые по составу фазы, при этом образование некоторых новых фаз, в зависимости от конкретного температурного цикла, замедляется или полностью подавляется [20, 21, 27].

Среди возможных продуктов разрушения полимерной составляющей ОСПк (на примере полидиметилфенилсилоксана): водорода, воды, углекислого и угарного газов, метана, бензола, муравьиной кислоты, формальдегида, трёх- и четырёхзвенных метилциклоксанов, существенное влияние на образование пор и неметаллических включений оказывают первые два. При температурах выше 720 °С еще одним продуктом разложения является аморфный кремнезем [19, 20, 26]. При сварке из-за наличия защитной атмосферы углекислого газа процесс «силоксанового структурирования» полиорганосилоксанов происходит преимущественно на периферийных участках на некотором удалении от сварного шва. Дегидроксилизация слоистых гидросилика-

тов и дальнейшее разложение воды может приводить к повышению окисленности сварочной ванны и увеличению пористости металла. Продуктами высокоскоростного терморазложения слоистых гидросиликатов является большое количество рентгеноаморфной фазы и плохо окристаллизованные оксиды [20, 21, 26, 27], например, в случае мусковита – SiO₂ и Al₂O₃, в случае талька – SiO₂ и MgO, при наличии обоих силикатов – магнево-алюминиевая шпинель MgO·Al₂O₃

В диапазоне исследуемых толщин ОСПк 25–250 мкм зависимость пористости металла шва от толщины носит экспоненциальный характер. По критерию методики определены максимальные толщины ОСПк, соответствующие возможности использования Пк без ограничения и в особых случаях для нетяжело нагруженных конструкций: для ОС-56-22 данные толщины составляют порядка 30 и 75 мкм, для ОС-51-03 серого и ОС-82-01 – 50 и 90 мкм, а для ОС-51-03 зеленого – 80 и 130 мкм соответственно. Для ОС-82-01 выбран несколько заниженный относительно усредненных значений диапазон толщин ввиду сильного разброса данных по общей площади пор.

Состав неметаллических включений. Для грунтовок АК-070, ВЛ-023, Эпокси-Коут-0263С при толщинах сухого слоя 20–45 мкм обнаружены только неметаллические включения типичные для сварных соединений из низколегированных сталей, выполненных по чистой поверхности. На рисунке 4а представлено включение, состоящее преимущественно из оксидов железа, марганца и кремния – элементов, входящих в состав стали. Специфичных для каждой марки Пк элементов, составляющих не менее 1,5 масс.% сухого слоя, а именно: для АК-070 – стронция, хрома; для ВЛ-023 – цинка, магния, кальция, фосфора; для ЭпоксиКоут-0263С – цинка и магния обнаружено не было.

Для ГФ-021 Экспресс элементный состав включений (рис. 4б) более разнообразен: в них обнаружены следы титана, кальция и алюминия, оксиды которых имеют температуры плавления выше температуры плавления стали (1843, 2572 и 2050 °С, соответственно). Присутствие данных элементов обусловлено большим содержанием наполнителей и пигментов в Пк (72 масс.% Пк): кальция – более 10 масс.%, магния – более 3 масс.%, титана – более 2 масс.%; алюминий, не входящий в формульный состав, определен EDS в количестве 0,23 масс.%. Обнаруженные неметаллические включения имеют округлую или глобулярную форму, а их линейные размеры не превышают 4 мкм. На оси перемещения электрической дуги разложение и испарение продуктов

деструкции Пк протекают с максимальной интенсивностью, в то время как на краю сварочной ванны температуры ниже. В точках сопряжения расплавленного металла сварочной ванны, металла подложки, Пк и газовой среды происходят металлургические процессы, характеризующиеся быстротечностью и нестабильностью, а их результатом является крайне неоднородная по составу шлаковая корка (рис. 4в).

В шве, выполненном по ЭпоксиКоут Цинк, неметаллические включения не превышают в диаметре 5 мкм. Во включении, приведенном на рисунке 4г, видны участки, сформированные при различных температурах: более тугоплавкий участок содержит оксиды алюминия и кальция, а менее тугоплавкий преимущественно состоит из сульфида марганца. Важно подчеркнуть полное отсутствие следов цинка, составляющего до четверти массы сухого Пк.

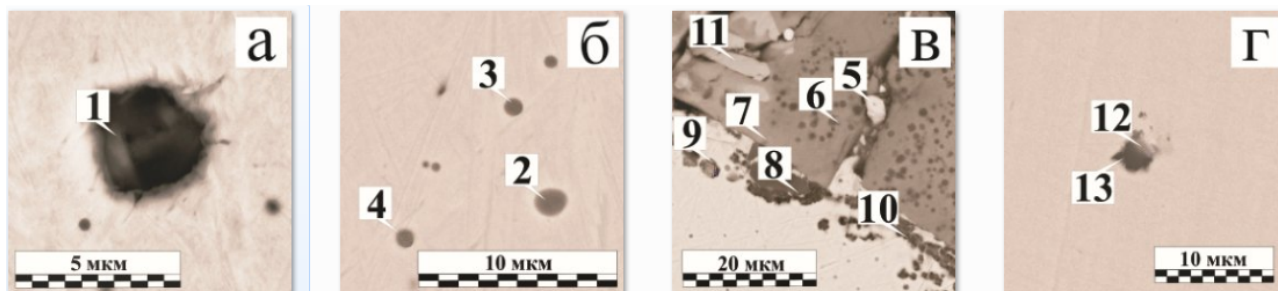


Рис. 4. Неметаллические включения в валиках, наплавленных по покрытиям: а) ЭпоксиКоут-0263С; б) ГФ-021 Экспресс; в) ГФ-021 Экспресс (шлаковая корка); г) ЭпоксиКоут Цинк

Таблица 3

Элементный состав отдельных неметаллических включений в металле шва

№ рис.	Покрытие	δ, мкм	№ участка	O	Fe	Mn	Si	Al	Ca	Mg	Ti	S	Прочие*
				масс. %									
4а	ЭпоксиКоут 0263С	45	1	5,7	89,1	4,2	0,9	–	–	–	–	0,1	–
4б	ГФ-021 Экспресс	45	2	19,8	58,3	10,3	7,6	2,6	–	–	0,23	1,3	–
			3	15,8	69,5	5,7	6,7	2,3	–	–	–	–	–
			4	3,9	65,0	17,9	2,8	0,4	–	–	–	10,1	–
4в	ГФ-021 Экспресс	45	5	4,4	89,8	2,5	3,3	–	–	–	–	–	–
			6	46,8	3,9	21,0	27,1	0,4	0,5	0,3	–	–	–
			7	40,0	22,2	21,0	15,6	0,4	0,6	0,2	–	–	–
			8	50,1	2,6	0,4	1,4	45,1	–	–	0,3	–	–
			9	35,9	56,5	2,5	2,3	–	0,2	–	–	0,9	Cl, Na
			10	33,3	50,4	6,7	6,6	0,4	–	–	–	1,9	–
			11	26,3	58,4	14,0	1,4	–	–	–	–	–	Na
4г	Эпокси-Коут Цинк	100	12	10,7	32,0	30,1	1,7	5,7	0,6	0,6	–	18,7	–
			13	46,4	5,9	6,8	2,1	20,7	3,4	0,3	–	4,4	–
5а	ОС-51-03 зеленое	95	14	45,2	1,5	3,4	1,5	48,0	–	–	0,5	–	–
			15	39,5	1,9	25,7	15,5	15,0	0,6	0,3	1,5	–	–
5б	ОС-51-03 зеленое	160	16	3,8	94,4	0,9	0,9	–	–	–	–	–	–
5в	ОС-56-22	185	17	39,1	3,0	24,8	24,8	9,8	0,2	–	0,9	0,5	F
5г	ОС-82-01	160	18	29,5	58,5	0,8	2,1	–	0,3	–	0,3	1,4	P
			19	10,0	86,9	0,7	1,2	–	–	–	–	0,2	P

* – метод EDS не позволяет достоверно количественно определить массовую долю углерода

На рисунке 5 представлены характерные неметаллические включения в металле наплавленных валиков по защитным ОСПк. При исследовании швов, выполненных по ОС-51-03 зеленому, установлено, что природа неметаллических включений зависит от толщины сухого слоя

ОСПк. Так, в швах, наплавленных по ОСПк толщиной 95 мкм, наибольшее число дефектов являются неметаллическими включениями оксидного происхождения, количество очерченных пор при данных толщинах незначительно. Подавляющее

большинство оксидных включений имеют глобулярную форму и являются соединениями на основе железа, кремния и марганца. Часть данных оксидов выделилась в ходе металлургических процессов в объеме жидкого металла самостоятельно, другая – на границе более тугоплавких фаз, состоящих из продуктов деструкции Пк (соединениях алюминия, реже титана, магния, кальция). Наличие кальция в неметаллических включениях ОСПк указывает на наследственную связь с продуктами разложения теплостойкого талька, в котором в виде примесей находятся фосфаты и фториды кальция. Высокая окисленность сварочной ванны приводит к снижению содержания активных раскислителей кремния и марганца в основном металле до двух раз (0,50 и 1,15 % против 1,00 и 1,75 % соответственно). В ликвационных

областях, обедненных кремнием, также обнаружено некоторое количество карбидных и сульфидных включений. Наиболее любопытными с морфологической точки зрения являются глобулярные комплексные оксидные включения размером 20–30 мкм с наличием ярко выраженной гетерогенной границы внутри (рис. 5а). В центральной части содержатся частицы более тугоплавкого оксида алюминия Al_2O_3 , имеющие полигональную, неправильную форму. В ходе процесса кристаллизации на разветвленной поверхности частиц оксида алюминия выделились оксиды марганца MnO ($T_{пл} = 1780\text{ }^\circ C$) и кремния SiO_2 ($T_{пл} = 1730\text{ }^\circ C$), а также небольшое количество титаната железа $FeO-Ti_2O_3$.

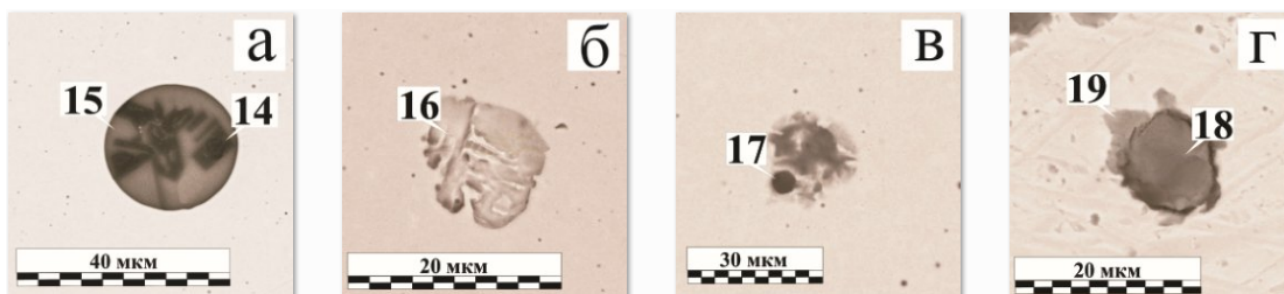


Рис. 5 Неметаллические включения в валиках, наплавленных по органосиликатным покрытиям: а) ОС-51-03 зеленое, 95 мкм; б) ОС-51-03 зеленое, 160 мкм; в) ОС-56-22; г) ОС-82-01

С увеличением толщины ОСПк до 160 мкм характер и состав включений претерпевает изменения: доля сферических включений (на основе железа с 2–4 масс. % алюминия и менее 1 масс. % титана) заметно снижается, а их размер редко превышает 2 мкм. Большинство включений имеют размер 8–15 мкм в диаметре и неправильную форму. Зарождение пор происходит на гетерогенной поверхности ранее сформированных включений, например, на рисунке 5в представлена пора диаметром 10 мкм, которая начала рост на поверхности оксидного включения. По поперечному сечению шва неметаллические включения распределены равномерно.

С рядом оговорок в зависимости от типа и природы компонентов Пк при исследовании состава неметаллических включений определены следующие тенденции:

- 1) с ростом толщины Пк наблюдается повышение содержания компонентов Пк в неметаллических включениях, а их размер увеличивается;
- 2) большинство включений состоят из оксидов железа, кремния и марганца;
- 3) продукты разрушения Пк встречаются в многокомпонентных включениях в виде соединений кислорода с алюминием, кальцием, титаном и магнием;

4) повышенная окисленность сварочной ванны вызывает обеднение металла шва элементами-раскислителями: кремнием и марганцем.

Обобщая вышеизложенное, следует отметить главенствующую роль процессов деструкции полимерных связующих и кислородосодержащих компонентов Пк в повышении степени окисленности сварочной ванны и, как следствие, роста количества пор и неметаллических включений.

Технологические особенности процесса сварки/наплавки. На рисунке 6 представлены образцы для исследования технологических параметров наплавки. В таблице 4 сведены данные о технологических и геометрических параметрах наплавов, проведенных по Пк девяти марок, а также параметры контрольного образца без Пк. При наплавке по грунтовкам АК-070, ВЛ-023, ГФ-021 Экспресс, ЭпоксиКоут-0263С исследуемых толщин сухого слоя валики практически идентичны по геометрическим параметрам контрольному образцу, выполненному по металлу без Пк. В оконечной части образца ВЛ-023 присутствует дефект – прерывание горения дуги. Теплостойкость грунтовки на основе поливинилбутирала составляет 250–280 °С.

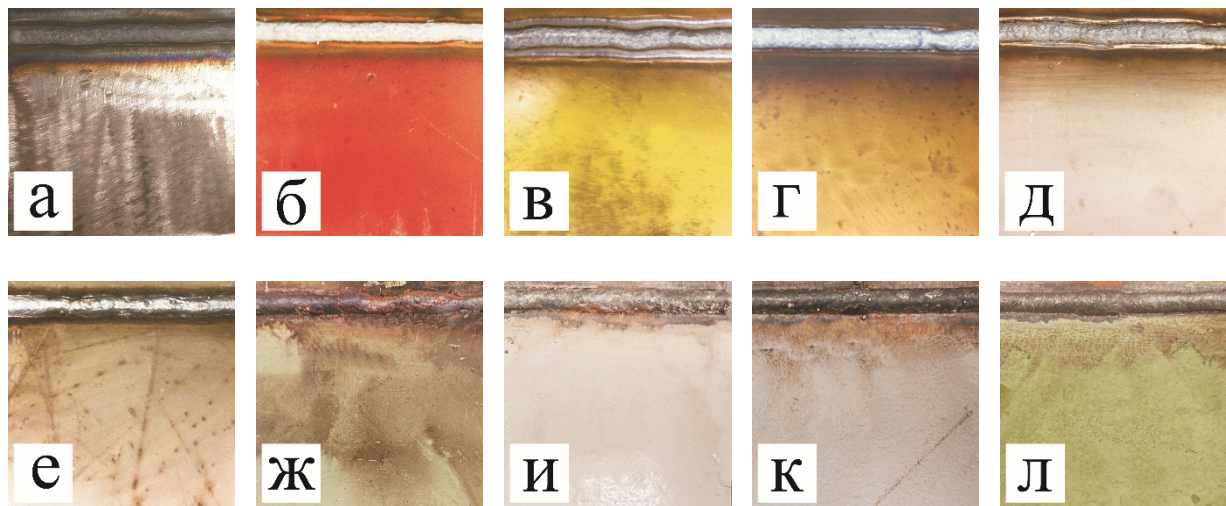


Рис. 6. Образцы для исследования влияния покрытий на технологические параметры наплавки:
 а) без покрытия; б) ЭпоксиКоут-0263С; в) АК-070; г) ВЛ-023; д) ГФ-021 Экспресс; е) ЭпоксиКоут Цинк;
 ж) ОС-51-03 зеленое; и) ОС-51-03 серое; к) ОС-56-22; л) ОС-82-01

Таблица 4

Влияние покрытий на параметры наплавленных валиков

Покрытие	δ , мкм	$M_{нм}$, г	$H_{ср}$, мм	$h_{ср}$, мм	b , мм	y , мм
Без покрытия	0	29,30	7,8	3,9	10,4±0,1	–
АК-070	40	29,32	7,4	4,4	10,4±0,4	5,1
ВЛ-023	25	29,00	7,6	3,8	10,0±0,1	0,0
ГФ-021 Экспресс	45	28,69	7,4	3,9	10,5±0,5	2,8
ЭпоксиКоут-0263 С	45	29,27	7,7	3,7	10,4±0,2	0,0
ЭпоксиКоут Цинк	100	25,85	6,0	2,5	9,6±0,6	1,3
ОС-51-03 зеленое	95	28,85	8,0	3,7	8,6±0,8	2,7
	160	28,70	7,7	3,4	7,4±1,3	2,3
ОС-51-03 серое	150	28,79	7,9	2,9	9,5±0,5	4,7
ОС-56-22	185	27,56	7,0	3,2	9,9±0,2	16,0
ОС-82-01	160	28,47	7,8	3,7	7,5±0,3	2,7

где $M_{нм}$ – масса наплавленного металла, г; $H_{ср}$ – средняя высота валика, мм; $h_{ср}$ – средняя глубина проплавления, мкм; b – ширина валика, мм; y – ширина зоны выгорания покрытия, мм.

Оценить нестабильность процесса сварки, определяемой колебаниями напряжения дуги и силы тока, легче всего по разбрызгиванию электродного металла. Значительным колебаниям напряжения дуги соответствует наибольшее разбрызгивание электродного металла, в последствии это приводит к необходимости снижения скорости сварки и потере эффективности процесса сварки/наплавки. Исследуемые Пк можно разбить на три группы по склонности к разбрызгиванию металла:

1) значительное разбрызгивание: ЭпоксиКоут Цинк и ОС-56-22;

2) среднее: ОС-51-03 (зеленое и серое) и ОС-82-01;

3) низкое: ГФ-021 Экспресс, ВЛ-023, ЭпоксиКоут-0263С и АК-070.

Наибольшее разбрызгивание электродного металла было зафиксировано при наплавке по ЭпоксиКоут Цинк и обусловлено комплексным влиянием толщины (100 мкм) и состава Пк, определившим активное испарение цинка. Пары цинка, попадая в столб электрической дуги, снижают ее собственное сопротивление и вызывают колебания напряжения и увеличение сечения дуги. Нестабильность сварки отражается не только в виде визуального наличия брызг и повреждений на Пк, но и в потерях массы наплавленного металла, которые при наплавке по ЭпоксиКоут Цинк превышают 10 %. Помимо значительного разбрызгивания и потери массы наплавка по ЭпоксиКоут Цинк характеризуется снижением на треть глубины проплавления и нестабильностью ширины валика.

Для образцов, окрашенных ОСПк, характерно заметное изменение формы шва: переменная ширина валика, снижения глубины проплавления и доли участия основного металла. Среди ОСПк наибольшая нестабильность геометрических параметров валика и дефектов формы наблюдается для марок ОС-51-03 зеленого и серого. Ввиду низкой адгезии к подложке Пк ОС-56-22 легко отслаивается, ширина зоны выгорания составляет 16,0 мм. Это дает возможность жидкому металлу сварочной ванны беспрепятственно смачивать поверхность, что создает условия для формирования наиболее благоприятной геометрии валика среди всех рассматриваемых толстослойных защитных Пк. Теплостойкое Пк ОС-82-01 обладает наибольшей сопротивляемостью растрескиванию вдоль границы наплавленного валика.

Обобщая технологические особенности наплавки по защитным Пк, в первую очередь следует отметить влияние толщины сухого слоя Пк. Для тонкослойных грунтовок в пределах рекомендуемых толщин значительных изменений геометрических параметров валиков, повышенного разбрызгивания или нестабильности процесса не наблюдается. Превышение рекомендуемых толщин грунтовок или использование защитных Пк больших толщин влечет за собой появление дефектов формы валика, снижение стабильности и проплавления способности дуги, в ряде случаев значительное разбрызгивание электродного металла и, как следствие, потери массы наплавленного металла. Нестабильность горения дуги приводит к снижению скорости сварки и общей эффективности процесса. Ширина зоны выгорания вдоль сварного шва/ наплавленного валика зависит от теплостойкости и адгезионных свойств Пк.

Выводы:

1. Склонность Пк к образованию пор и неметаллических включений при электродуговой сварке в первую очередь зависит от масштабности и интенсивности протекания процессов деградации полимерных связующих и кислородосодержащих компонентов Пк, повышающих степень окисленности сварочной ванны.

2. По критерию методики определения склонности к порообразованию EN ISO 17652-2:2003 допускается использовать грунтовки Эпоксикоут-0263С и АК-070 в качестве неснимаемых перед сваркой Пк без ограничений на нижней границе интервалов рекомендованных толщин (20–30 мкм и 10–30 мкм, соответственно), на верхней границе интервалов – в особых случаях для нетяжело нагруженных конструкций. Использование грунтовки ВЛ-023 до-

пускается без ограничений лишь в узком диапазоне рабочих толщин 15–18 мкм, использование грунтовки ГФ-021 Экспресс – не допускается. Расширяя рамки использования методики на другие защитные Пк, определено, что цинкнаполненное Эпоксикоут Цинк не склонно к избыточному порообразованию при толщинах 40–120 мкм. Максимальные толщины ОСПк, соответствующие возможности ограниченного использования, составляют для ОС-56-22 серого – 75 мкм, для ОС-51-03 серого и ОС-82-01 зеленого – 90 мкм, для ОС-51-03 зеленого – 130 мкм.

3. Природа неметаллических включений в металле наплавленных по Пк валиков в подавляющем большинстве является оксидной на основе элементов, входящих в состав стали: железа, кремния и марганца. Тугоплавкие продукты разрушения Пк (оксиды титана, кальция, алюминия, магния и др.) присутствуют в сложных многокомпонентных соединениях и являются инициаторами дальнейшего роста включений и образования газовых пор.

4. В пределах рекомендуемых толщин грунтовок Эпоксикоут-0263С, АК-070, ВЛ-023, ГФ-021 Экспресс не вносят существенных изменений в стабильность процесса сварки и геометрические параметры наплавленных валиков. Превышение рекомендуемых толщин грунтовок или использование защитных Пк больших толщин влечет за собой появление дефектов формы валика, снижение стабильности и проплавления способности дуги, в ряде случаев значительную потерю массы металла на разбрызгивание. Нестабильность горения дуги приводит к снижению скорости сварки и общей эффективности процесса. Ширина зоны выгорания вдоль сварного шва/наплавленного валика зависит от теплостойкости и адгезионных свойств Пк.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kapustka N., Blomquist P. Improved Welding of Primer - Coated Steels // *Welding Journal*. 2015. V. 94. No. 5. Pp. 46–50.
2. Yuan Y., Yamazaki K., Suzuki R. Relationship between Penetration and Porosity in Horizontal Fillet Welding by a New Process «Hybrid Tandem MAG Welding Process» // *Weld World*. 2016. V. 60. Pp. 515–524. DOI 10.1007/s40194-016-0314-z.
3. Савицкий А.М., Ващенко В.Н., Бобров И.Б. Особенности сварки изделий с защитным эмалевым покрытием // *Автоматическая сварка*. 2006. №3(635). С. 37–39.
4. Volpone M., Mueller S. Problems Linked to Welding and Cutting of Primer Treated Metal Sheets // *Welding International*. 2006. No. 20(12). Pp. 942–947. DOI: 10.1533/wint.2006.3688.

5. Rexach A., Naik S., Taylor A. Weldable Anticorrosion Coatings for Steel Protection // European Corrosion Congress. 2016. Vol. 4. Pp. 2578–2586.
6. Yu J., Kim D. Effects of Welding Current and Torch Position Parameters on Minimizing the Weld Porosity of Zinc-Coated Steel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 95. Pp. 551–567. DOI:10.1007/s00170-017-1180-6.
7. Freitag W., Stoye D. Paints, Coatings and Solvents: second, oompletely rev. ed. Wiley-VCH. Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo. 1998. 414 p. DOI: 10.1002/9783527611867.
8. Dražić D., Stojan S., Kulenovic Z. Corrosion Protection in Shipbuilding. 14th International Conference on Transport Science. Portoroz, 2011, Pp. 1–8.
9. Fitz-Gerald J., Agnew S., Moffat W., Sharp S., Gillespie J., Becker D., Liu R., Runion A. Innovative Coating Removal Techniques for Coated Bridge Steel. Virginia Transportation Research Council. 2019. 66 p.
10. Babets K., Geskin E.S. Application of Fuzzy Logic for Modeling of Waterjet Depainting. Machining Science and Technology. 2000. Vol. 4, No. 1. Pp. 81–100. DOI:10.1080/10940340008945701.
11. Operowsky R.M. Chemical immersion paint stripping. Metal Finishing. 2000. V. 98(6), Pp. 477–480. DOI:10.1016/s0026-0576(00)80447-x.
12. D'Addona D.M., Genna S., Giordano A., Leone C., Matarazzo D., Nele L. Laser Ablation of Primer During the Welding Process of Iron Plate for Shipbuilding Industry. 9th Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. 2015. V. 33. Pp. 464–469. DOI:10.1016/j.procir.2015.06.055.
13. Šolić T., Marić D., Jagodić Ž., Samardžić I. Testing of the Shopprimer's Influence on the Quality of Welded Joint // Metalurgija. 2017. Vol. 56, No. 3–4. Pp. 357–360.
14. Шатов А.П., Стеклов О.И., Ступников В.П. Сварка и ремонт металлических конструкций с противокоррозионными покрытиями. М.: Изд-во МГТУ, 2009. 175 с.
15. Turyk E. Suitability of primers for steel components welded without removing the primer // Welding Technology Review. 2013. V. 85, No. 11. Pp. 25–29.
16. Ault J.P. Retaining Pre-Construction Primers during Shipbuilding // Journal of Protective Coatings and Linings. 2011. V. 28, No. 11. Pp. 11–19.
17. Степанов Ю.А., Вахрушев О.В., Трофимова А.Н. Влияние защитных покрытий на свойства сварных соединений // Сварочное производство. 2007. №10 (875). С. 33–34.
18. Рощупкин Н.П., Лялин К.В., Шевченко С.А. Оценка влияния грунтовочных покрытий на технологию электродуговой сварки конструкционной стали // Сварочное производство. 1978. №6. С. 18–20.
19. Чуппина С.В. Современное состояние материаловедения органосиликатных композиций // Физика и химия стекла. 2006. Т. 32. № 2. С. 339–351.
20. Чуппина С.В., Жабрев В.А. Органосиликатные материалы. СПб: Литео, 2016. 182 с.
21. Харитонов Н.П., Кротиков В.А., Худобин Ю.И., Буслаев Г.С., Степанов К.Н. Органосиликатные материалы, их свойства и технология применения. Л.: Наука, 1979. 202 с.
22. Forsström L. Possibilities of Advanced MAG-Welding Processes in Shipbuilding // Master's thesis. Turku. 2016. 110 p.
23. Olson D.L., Dixon R., Liby A.L. Welding: Theory and Practice // Elsevier Science Publishers B.V., 1990. 389 p.
24. Жабрев Л.А., Чуппина С.В., Панченко О.В., Репин И.Л., Попович А.А. Влияние состава и толщины органосиликатных покрытий на процесс электродуговой сварки // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92, №9. С. 1197–1206. DOI: 10.1134/S0044461819090135.
25. Shatov A.P., Onosov G.V., Steklov O.I. Improving the Quality of Welded Structures with Corrosion-Resisting Lacquer and Varnish Coatings. Welding International. 2014. V. 28, No. 12, Pp. 980–982. DOI:10.1080/09507116.2014.884331.
26. Чуппина С.В., Жабрев В.А. Химические реакции при отверждении органосиликатных композиций и старении органосиликатных покрытий // Физика и химия стекла. 2008. Т. 34. №1. С. 104–115.
27. Мецик М.С. Термические свойства кристаллов слюды. Иркутск: Изд-во иркут. ун-та. 1989. 184 с.

Информация об авторах

Жабрев Леонид Анатольевич, инженер лаборатории легких материалов и конструкций. E-mail: leozhabrev@spbstu.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Панченко Олег Владиславович, кандидат технических наук, доцент высшей школы физики и технологии материалов. E-mail: panchenko_ov@spbstu.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Шамшурин Алексей Игоревич, научный сотрудник лаборатории «Дизайн материалов и аддитивного производства». E-mail: shamshurin_ai@spbstu.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Чуппина Светлана Викторовна, доктор химических наук, доцент, научный руководитель химических технологий. E-mail: tchour@nmp.ru. ООО «Группа НМП» – управляющая организация АО «Нева Металл Посуда», Россия, 195067, г. Санкт-Петербург, пр. Маршала Блюхера, д.78, лит. Н.

Лебедева Екатерина Александровна, заместитель генерального директора по науке и производству. E-mail: e.lebedeva@promlkm.ru. ООО «Завод ВДМ «Пигмент», Россия, 195248, г. Санкт-Петербург, Ириновский пр., д.1, лит. Н, пом. 70.

Поступила 06.08.2020 г.

© Жабрев Л.А., Чуппина С.В., Шамшурин А.И., Лебедева Е.А., Панченко О.В., 2020

^{1,}Zhabrev L.A., ²Chuppina S.V., ¹Shamshurin A.I., ³Lebedeva E.A., ¹Panchenko O.V.*

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

²NMP Group LTD, Managing Company, LTD Neva Metall Posuda

³LTD «Factory VDM «Pigment»

**E-mail: leozhabrev@spbstu.ru*

EVALUATION OF COATINGS TENDENCY TO THE PORES AND NON-METAL INCLUSIONS FORMATION IN A WELD

Abstract. *The task of welding steel elements painted with various coatings is found in a number of industries at the stages of factory assembly and installation of large-sized structures, as well as during repair and restoration work. The porosity of the welded metal is the most common defect in electric arc welding without removing the coating, and the tendency to pore formation is a normalized parameter in the certification of interoperable primers (EN ISO 17652-2: 2003). The studies carried out cover widespread polyacrylate, alkyd, epoxy, polyvinyl butyral primers in an extended working thicknesses range. In addition, the evaluation technique is used for zinc-filled and organosilicate protective coatings. Based on the study of the nonmetallic inclusions composition in a weld by energy dispersive X-ray spectroscopy and using a scanning electron microscope, the behavior features of the coatings destruction products and their derivatives during physical and chemical transformations under welding are described. The technological features of welding without coating removing are noted: stability of the mode parameters, resistance to metal spraying and coating burnout activity in the areas adjacent to a weld.*

Keywords: *porosity, non-metallic inclusions, high-temperature degradation, organosilicate coatings, shop-primers, zinc-filled coatings*

REFERENCES

1. Kapustka N., Blomquist P. Improved Welding of Primer – Coated Steels. *Welding Journal*. 2015. Vol. 94. No. 5. Pp. 46–50.

2. Yuan Y., Yamazaki K., Suzuki R. Relationship between Penetration and Porosity in Horizontal Fillet Welding by a New Process «Hybrid Tandem MAG Welding Process». *Weld World*. 2016. Vol. 60. Pp. 515–524. DOI 10.1007/s40194-016-0314-z.

3. Savitsky A.M., Vaschenko V.N., Bobrov I.B. Features of Welding Products with Protective Enamel Coating [Osobennosti svarki izdelij s zashchitnym emale-vym pokrytiem]. *The Paton Welding Journal*. 2006. No. 3 (635). Pp. 32–34. (rus)

4. Volpone M., Mueller S. Problems Linked to Welding and Cutting of Primer Treated Metal Sheets. *Welding International*. 2006. No. 20(12). Pp. 942–947. DOI: 10.1533/wint.2006.3688.

5. Rexach A., Naik S., Taylor A. Weldable Anticorrosion Coatings for Steel Protection. *European Corrosion Congress*. 2016. Vol. 4. Pp. 2578–2586.

6. Yu J., Kim D. Effects of Welding Current and Torch Position Parameters on Minimizing the Weld Porosity of Zinc-Coated Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 95. Pp. 551–567. DOI:10.1007/s00170-017-1180-6.

7. Freitag W., Stoye D. *Paints, Coatings and Solvents: second, oompletely rev. ed.* Wiley-VCH. Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo. 1998. 414 p. DOI: 10.1002/9783527611867.

8. Dražić D., Stojan S., Kulenovic Z. Corrosion Protection in Shipbuilding. *14th International Conference on Transport Science*. Portoroz, 2011, Pp. 1–8.

9. Fitz-Gerald J., Agnew S., Moffat W., Sharp S., Gillespie J., Becker D., Liu R., Runion A. *Innovative Coating Removal Techniques for Coated*

Bridge Steel. Virginia Transportation Research Council. 2019. 66 p.

10. Babets K., Geskin E.S. Application of Fuzzy Logic for Modeling of Waterjet Depainting. *Machining Science and Technology*. 2000. Vol. 4, No. 1. Pp. 81–100. DOI:10.1080/10940340008945701.

11. Operowsky R.M. Chemical immersion paint stripping. *Metal Finishing*. 2000. Vol. 98(6), Pp. 477–480. DOI:10.1016/s0026-0576(00)80447-x.

12. D'Addona D.M., Genna S., Giordano A., Leone C., Matarazzo D., Nele L. Laser Ablation of Primer During the Welding Process of Iron Plate for Shipbuilding Industry. 9th Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. 2015. V. 33. Pp. 464–469. DOI:10.1016/j.procir.2015.06.055.

13. Šolić T., Marić D., Jagodić Ž., Samardžić I. Testing of the Shopprimer's Influence on the Quality of Welded Joint. *Metalurgija*. 2017. Vol. 56, No. 3–4. Pp. 357–360.

14. Shatov A.P., Steklov O.I., and Stupnikov, V.P. Welding and repair of metallic constructions with anticorrosion coatings [Svarka i remont metallicheskih konstruktsiy s protivokorroziionnymi pokrytiami]. Moscow. Mosk. Gos. Tekhn. Univ. 2009. 175 p. (rus)

15. Turyk E. Suitability of primers for steel components welded without removing the primer [Przydatność farb do malowania elementów stalowych spawanych bez usuwania powłoki]. *Welding Technology Review*. 2013. V. 85, No. 11. Pp. 25–29.

16. Ault J.P. Retaining Pre-Construction Primers during Shipbuilding. *Journal of Protective Coatings and Linings*. 2011. Vol. 28, No. 11. Pp. 11–19.

17. Stepanov Yu.A., Vakhrushev O.V., Trofimova A.N. Influence of protective coatings on the properties of welded joints [Vliyaniye zashchitnykh pokrytiy na svoystva svarnykh soyedineniy]. *Welding Production*. 2007. No. 10 (875). Pp. 33–34. (rus)

18. Roshchupkin N.P., Lyalin K.V., Shevchenko S.A. Assessment of the influence of primer coatings on the technology of electric arc welding of structural steel [Otsenka vliyaniya

gruntovochnykh pokrytiy na tekhnologiyu elektrodugovoy svarki konstruktsionnoy stali]. *Welding production*. 1978. No. 6. Pp. 18–20. (rus)

19. Chuppina S.V. The Current State of the Art in Materials Science of Organosilicate Composites. [Osobennosti svarki izdelij s zashchitnym emalevym pokrytiem] *Glass Physics and Chemistry*. 2006. Vol. 32. № 2. P. 243–253. DOI: 10.1134/S1087659606020192. (rus)

20. Chuppina S.V., Zhabrev V.A. Organosilicate materials [Organosilikatnye materialy]. St. Petersburg. Liteo. 2016. 182 p. (rus)

21. Kharitonov N.P., Krotikov V.A., Khudobin Yu.I., Buslaev G.S., Stepanov K.N. Organosilicate materials, their properties and application technology [Organosilikatnyye materialy, ikh svoystva i tekhnologiya primeneniya]. Leningrad. Nauka. 1979. 202 p. (rus)

22. Forsström L. Possibilities of Advanced MAG-Welding Processes in Shipbuilding. Master's thesis. Turku. 2016. 110 p.

23. Olson D.L., Dixon R., Liby A.L. *Welding: Theory and Practice*. Elsevier Science Publishers B.V., 1990. 389 p.

24. Zhabrev L.A., Chuppina S.V., Panchenko O.V., Repin I.L., Popovich A.A. Effect of Composition and Thickness of Organosilicate Coatings on the Arc Welding Process. *Journal of Applied Chemistry*. 2019. Vol. 92, No. 9. Pp. 1274–1283. DOI: 10.1134/S1070427219090131.

25. Shatov A.P., Onosov G.V., Steklov O.I. Improving the Quality of Welded Structures with Corrosion-Resisting Lacquer and Varnish Coatings. *Welding International*. 2014. Vol. 28, No. 12, Pp. 980–982. DOI:10.1080/09507116.2014.884331.

26. Chuppina S.V., Zhabrev V.A. Chemical Reactions in the Course of Curing of Organosilicate Composites and Aging of Organosilicate Coatings *Glass Physics and Chemistry*. 2008. Vol. 34, No. 1. Pp. 82–90. DOI: 10.1007/s10720-008-1012-8.

27. Metsik M.S. Thermal properties of mica crystals [Termicheskiye svoystva kristallov slyudy]. Irkutsk: Izd-vo irkut. un-ta. 1989. 184 p. (rus)

Information about the authors

Zhabrev, Leonid A. Engineer. E-mail: leozhabrev@spbstu.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29.

Panchenco, Oleg V. PhD, Assistant professor. E-mail: panchenko_ov@spbstu.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29.

Shamshurin, Alexei I. Researcher. E-mail: shamshurin_ai@spbstu.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29.

Chuppina, Svetlana V. DSc. Assistant professor. Scientific Director for Chemical Engineering. E-mail: tchoup@nmp.ru. NMP Group LTD, Managing Company, LTD Neva Metall Posuda, Russia, 195067, St.Petersburg, Marshal Blueher pr., 78, lit. N.

Lebedeva, Ekaterina A. Deputy General Director for Science and Production. E-mail: e.lebedeva@promlkm.ru. LTD "Factory VDM «Pigment», Russia, 195248, St.Petersburg, Irinovskiy pr., 1, lit. N, r. 70

Received 06.08.2020

Для цитирования:

Жабрев Л.А., Чуппина С.В., Шамшурин А.И., Лебедева Е.А., Панченко О.В. Оценка склонности покрытий к образованию пор и неметаллических включений в сварном шве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 9. С. 67–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-67-80

For citation:

Zhabrev L.A., Chuppina S.V., Shamshurin A.I., Lebedeva E.A., Panchenko O.V. Evaluation of coatings tendency to the pores and non-metal inclusions formation in a weld. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 9. Pp. 67–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-67-80