

УДК 621.375.826

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

С.Б. ШЕВЧЕНКО¹, И.В. КРИВЦУН¹, Л.Ф. ГОЛОВКО¹, А.Н. ЛУТАЙ¹, В.П. СЛОБОДЯНЮК²

¹ НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: leongolovko@gmail.com

² ПАО «ПлазмаТек». 21036, г. Винница, Хмельницкое шоссе, 13/300.

Приведен анализ процессов изготовления проволочных электродов для полуавтоматической сварки, изучены структура, количественный химический и фазовый состав поверхностного слоя проволоки до и после нанесения медного покрытия, определены геометрические размеры, глубина расположения и относительное количество неметаллических включений в покрытии. Исследованы возможности удаления таких неметаллических включений лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм при различных параметрах обработки. Предложена технология лазерной очистки поверхности сварочной проволоки, которая выполняется перед нанесением медного покрытия. Для апробации результатов разработки в условиях, приближенных к производственным, разработан экспериментальный лазерный технологический комплекс. Библиогр. 10, рис. 15.

Ключевые слова: сварочная проволока, неметаллические включения, оксиды, лазерное излучение, поглощательная способность, температура, моделирование, нагрев, испарение, остаточные напряжения

Полуавтоматическая сварка проволочным электродом широко применяется в различных отраслях промышленности. При этом в качестве сварочного электрода наиболее часто используется стальная проволока диаметром 0,8...1,6 мм с медным гальваническим покрытием. Процесс сварки и ее качество в значительной мере зависят от однородности химического состава поверхностного слоя самой стальной проволоки и обусловленного этим качества медного покрытия.

В связи с этим, перед нанесением медного покрытия поверхность стальной проволоки подвергают различным способам очистки – очистка от ржавчины и смазки металлическими щетками одновременно при рядной намотке [1], механическая очистка путем протягивания ее через свивку из одного или нескольких витков самой сварочной проволоки (петля в виде «восьмерки») [2]. Наиболее приемлемым является процесс очистки повторным протягиванием через фильеры, но он значительно больше, чем в 2 раза, увеличивает себестоимость ее изготовления [1, 3]. К тому же, механическая очистка приводит к мгновенной коррозии очищенной поверхности, повышенному износу направляющих и концевника сварочного аппарата.

Химическая очистка также вызывает коррозию как самой проволоки, так и соприкасающихся с ней деталей оборудования. Для этих целей применяют способ электролитно-разрядной очистки, включающий катодную обработку сварочной проволоки в электролите — водном растворе хлорида или карбоната натрия [4].

В процессе волочения сварочной проволоки используется сухая смазка на основе солей жирных кислот. Наличие на проволоке остатков технологической смазки нарушает электрический контакт, что приводит к прерыванию дуги, ухудшению качества сварки.

Известно применение для очистки сварочной проволоки от остатков технологической смазки ультразвука [5]. При прохождении проволоки через ванну ультразвуковой очистки остатки технологической смазки и загрязнений размягчаются и смываются моющим раствором. При выборе моющего раствора учитывают, что моющие среды должны иметь высокую химическую активность, эффективно разрыхлять, разрушать или растворять остатки загрязнений. К тому же, при ультразвуковой обработке в жидких средах возникает явление кавитации — схлопывание газовых пузырьков, образующихся при сжатии и расширении жидкости. Кавитация сопровождается возникновением высоких мгновенных гидростатических давлений, которые отрывают прилипшие к поверхности металла частицы загрязнений. На степень ультразвуковой очистки сварочной проволоки от остатков технологической смазки оказывают влияние тип моющего средства, его концентрация и температура, скорость волочения. Немаловажное влияние на качество ультразвуковой очистки оказывает непосредственно скорость волочения. Так, при использовании одного и того же моющего средства и одинаковых концентраций и температур рабочего раствора результаты очистки проволоки на разных скоростях будут различ-

ны — остаточное количество технологической смазки будет тем меньше, чем ниже скорость волочения проволоки (речь идет о скоростях волочения 2...3 м/с).

Использование очищенной проволоки в современном сварочном оборудовании позволяет избежать нарушений электроконтакта в процессе сварки, а следовательно, прерывания дуги, повысить его стабильность, снизить влияние других факторов, ухудшающих качество сварного шва.

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что к настоящему времени разработан целый ряд различных способов очистки сварочной проволоки от различного рода загрязнений, позволяющих лишь частично снизить разбрызгивание материала электродов при сварке, но не решить проблему в целом.

Проблема повышения качества сварочной проволоки может решаться несколькими путями — усовершенствованием технологии нанесения высококачественного медного покрытия, значительным снижением шероховатости поверхности проволоки применением различного рода полировок, разработкой новых способов нанесения высокоэффективных защитных покрытий.

В настоящее время в основном используется дорогостоящая омедненная сварочная проволока. Основное назначение медного покрытия заключается в обеспечении хорошего электрического контакта при подаче сварочного тока на проволоку. Но с экологической точки зрения применение медного покрытия на сварочной проволоке приводит к опасному загрязнению производства и окружающей среды. Кроме того, при использовании омедненной проволоки снижается качество сварного шва.

В качестве альтернативы омеднению ведущие мировые производители освоили выпуск проволоки со шлифованной и полированной поверхностью. Ее стоимость на 5...8 % выше, чем омедненной. Недостатком полированной проволоки является интенсивное ее корродирование в атмосфере влажного воздуха.

Разработаны плазменно-дуговой и электроискровой способы обработки поверхности. Плазменно-дуговой способ позволяет экологически чисто, высококачественно и сравнительно дешево очищать и обезгаживать сварочную проволоку. При этом одновременно осуществляется ее термовакуумная обработка, что еще больше повышает качество сварки. Стоимость плазменно-дуговой очистки сварочной проволоки существенно ниже, чем кислотной или дуговой.

Перспективным представляется электроискровой метод очистки поверхности металла. Этот метод также является экологически чистым и экономически эффективным.

Анализ различных методов и устройств для очистки сварочной проволоки перед нанесением медного покрытия, приведенный в работе [6], показал на определенные перспективы применения для этих целей лазерной поверхностной обработки, чему и посвящено настоящее исследование.

Наиболее широко при механизированной сварке в защитных газах применяется сварочная проволока, получаемая холодным волочением горячекатаной заготовки из стали Св-08Г2С [7]. Заключительной операцией изготовления сварочной проволоки (перед ее намоткой на кассеты) является нанесение медного покрытия толщиной $h = 0,15 \dots 0,6$ мкм. Нижний предел толщины обусловлен формированием несплошного (островкового) слоя, верхний — снижением ударной вязкости и возникновением кристаллизационных трещин при превышении предельной концентрации меди в швах. Назначение медного покрытия — защитить сварочную проволоку от коррозии в среде атмосферных газов, уменьшить контактное сопротивление пары «электродная проволока — токоподводящий наконечник», улучшить условия первоначального возбуждения дуги, уменьшить изнашивание рабочего канала медного токопроводящего наконечника. Перечисленные функциональные характеристики медного покрытия определяются степенью однородности слоя и его адгезией. Последнее особо важно при использовании при сварке различных подающих механизмов, работа которых во многом зависит от адгезии медного покрытия, которая, в свою очередь, определяет устойчивость горения дуги [8]. В ИЭС им. Е.О. Патона исследовалось медное покрытие на сварочной проволоке, полученное методом электролитического осаждения в растворе медного купороса [8]. Выявлено, что непосредственно после осаждения слой меди имел значительную концентрацию пор и микротрещин. Деформация покрытия в волоке с применением смазки, которая, как предполагалось, закроет дефекты, не улучшила качество слоя.

В связи с этим на первом этапе данной работы необходимо провести детальный анализ дефектов медного покрытия, выявить причины и механизмы их возникновения и разработать на этой основе высокоэффективный способ и оборудование для существенного повышения качества сварочной проволоки.

Материалы и методика исследования. Изучали три типа объектов: омедненная проволока диаметром 1 мм после протяжки в последней волоке; проволока без покрытия диаметром 1 и 3 мм непосредственно после волочения; проволока диаметром 1 мм после полирования.

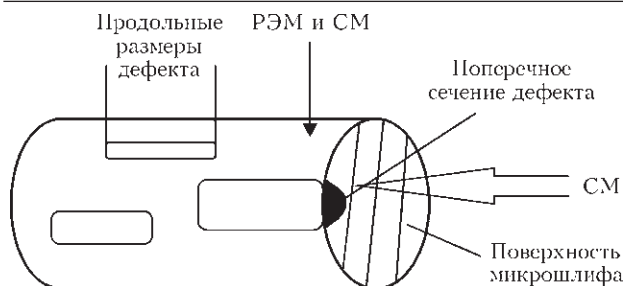


Рис. 1. Схема съемок объекта

Исследования проводили на металлографическом микроскопе МИМ-8 с использованием WEB-камеры с разрешением 3 мпс. Для выявления неметаллических включений кроме белого использовался поляризованный свет. Известно, что в указанном свете неметаллические включения видны на микрофотографиях как светлые области на темном фоне. Анализировались два типа поверхностей — поверхности микрошлифов и поверхности проволоки без какой-либо подготовки. Микрошлифы готовились в плоскости, перпендикулярной оси проволоки, и в плоскостях, образующих с осью угол примерно 30° (косой шлиф). В качестве травителя использовали 4 %-й раствор HNO₃ в спирте.

Цилиндрические поверхности исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) в отраженных и вторичных электронах. В определенных точках (диаметр электронного зонда примерно 50 нм) методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) проводился полный химический анализ. Микрофотографии анализировались по методикам, изложенным в работе [9].



Рис. 2. Микрофотография (x2000) поверхности медного покрытия (СМ)

На рис. 1 показана схема съемок микрофотографий при исследовании методами световой микроскопии (СМ) и РЭМ.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 2 представлена микрофотография поверхности медного покрытия, полученная методом СМ. Покрытие неоднородно – наблюдаются участки, в которых отсутствует характерный для меди цвет.

Малая глубина резкости светового микроскопа не позволяет более подробно описать наблюдаемые дефекты слоя. На электронных микрофотографиях различных участков покрытия (рис. 3) наблюдается большое количество поверхностных дефектов, имеющих вытянутую форму с длинной осью, совпадающей с направлением протяжки проволоки через волоку. Существенное различие в контрасте микрофотографий, полученных во вторичных (рис. 3, а, в) и отраженных электронах (рис. 3, б, г) объясняется следующими особенностями

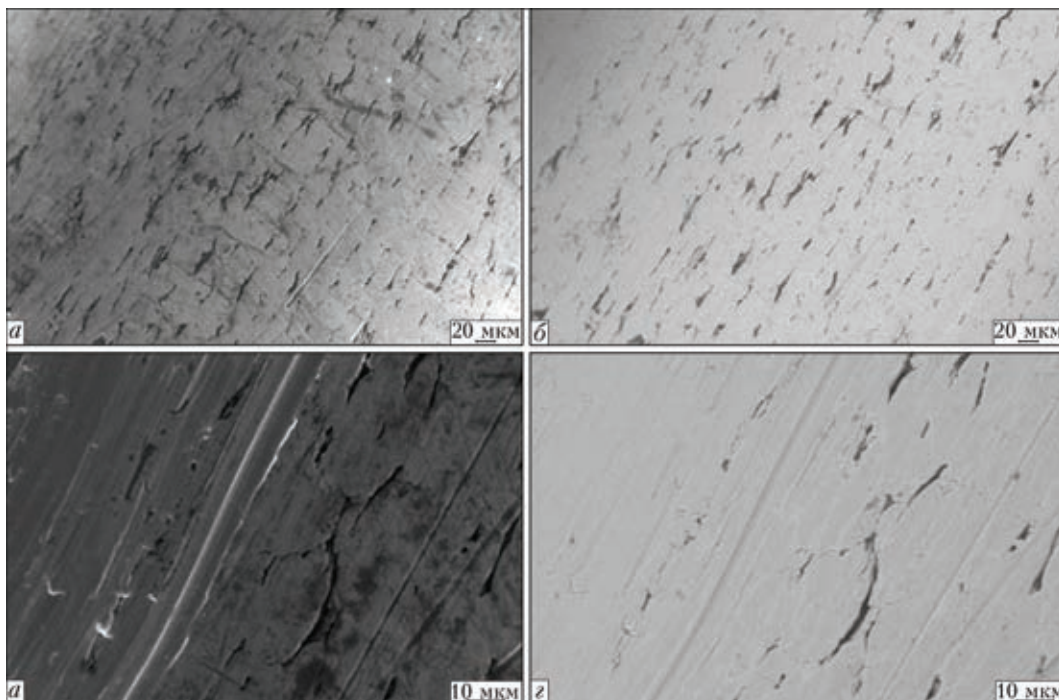


Рис. 3. Электронные микрофотографии различных участков медного покрытия: а, в — во вторичных; б, г — в отраженных электронах; а, б — x500; в, г — x2000

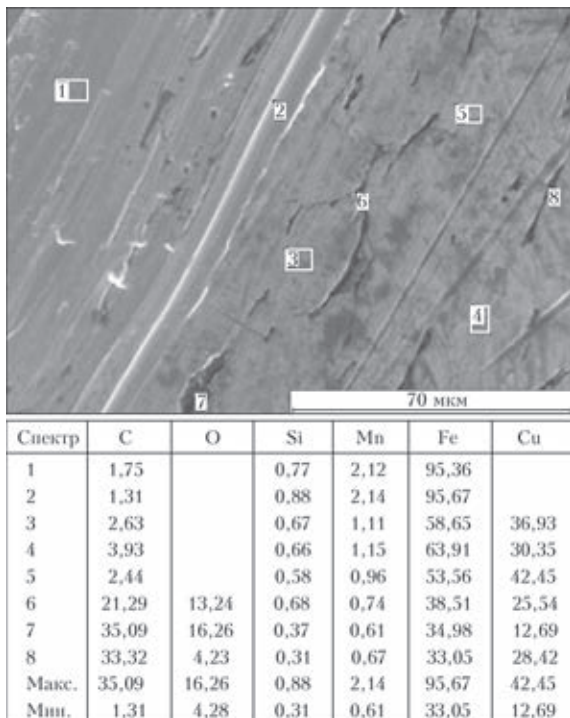


Рис. 4. Результаты рентгеноспектрального микроанализа химического состава участков, отмеченных на микрофотографии с помощью указанных методик. При съемке в отраженных электронах реализован способ регистрации электронов, минимизирующий топографическую составляющую контраста. Таким образом, на указанных микроснимках преобладает композиционный (фазовый) контраст — наиболее яркие участки микроснимка соответствуют областям образца, обогащенным более тяжелыми (с большей атомной массой) элементами.

Следовательно, светлые обширные области на рис. 3, б, г — это зоны меди либо поверхности стали. Определить какие участки соответствуют меди либо железу, основываясь лишь на различии в контрасте невозможно по причине близости атомных масс указанных элементов. Пятна и серый налет на микрофотографиях рис. 3, а, б — остатки рабочей смазки, используемой при волочении. Результаты рентгеноспектрального микроанализа химического состава различных участков

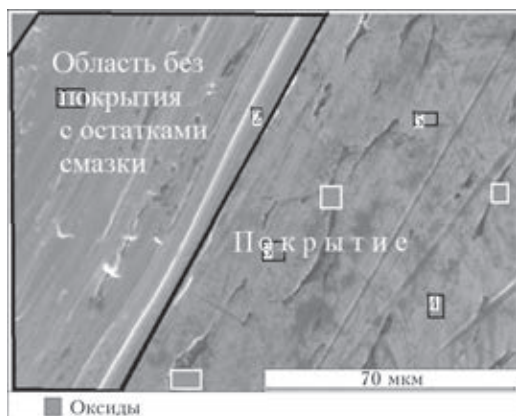


Рис. 5. Электронная микрофотография медного покрытия

образца (рис. 4) позволяют утверждать, что большая часть объемных дефектов представляет собой оксиды железа, покрытые тонким слоем меди. Более наглядно результаты РСМА представлены на рис. 5, из которого следует, что поверхность образца состоит из двух зон: область без следов покрытия, составляющая 38 % площади всей поверхности, и область покрытия с крупными включениями оксидов железа. Отсутствие покрытия на значительной площади поверхности, на наш взгляд, связано с недоброкачественной обработкой поверхности проволоки перед нанесением покрытия (неполное удаление смазки, недостаточное обезжиривание и т.д.).

Слабая адгезия покрытия на таких участках приводит к его удалению (сдиранию) при прохождении волокна.

Проанализируем возможные причины и механизмы появления оксидов железа в поверхностном слое проволоки. Первая — горячекатаная заготовка имеет на поверхности окалину, которая при протяжке впрессовывается (вминается) в сталь.

В работе [10] исследовался фазовый состав окалины на катанке из стали Св-08Г2С и методы ее удаления. Показано, что если механическое удаление окалины проводить при температуре существования вюстита (FeO), т. е. при $t \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$, то оксид удаляется полностью. Именно такая технология удаления окалины реализована в объектах настоящего исследования. Учитывая высокую скорость волочения ($\sim 12 \text{ м/с}$), можно предполагать, что за счет сил трения в месте контакта заготовки с инструментом происходит нагрев до высоких температур, что приводит к окислению поверхности проволоки. Металлографические исследования поперечных сечений микрошлифов подтвердили, что дефекты имеют значительные

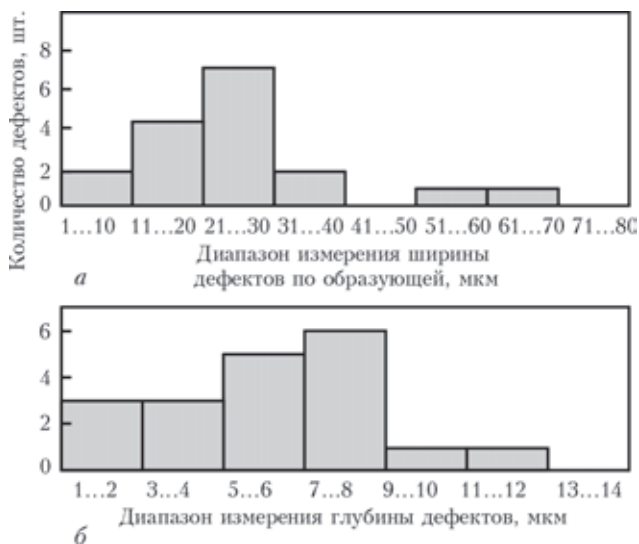


Рис. 6. Гистограммы линейных размеров дефектов: а — ширины; б — глубины поверхностных дефектов

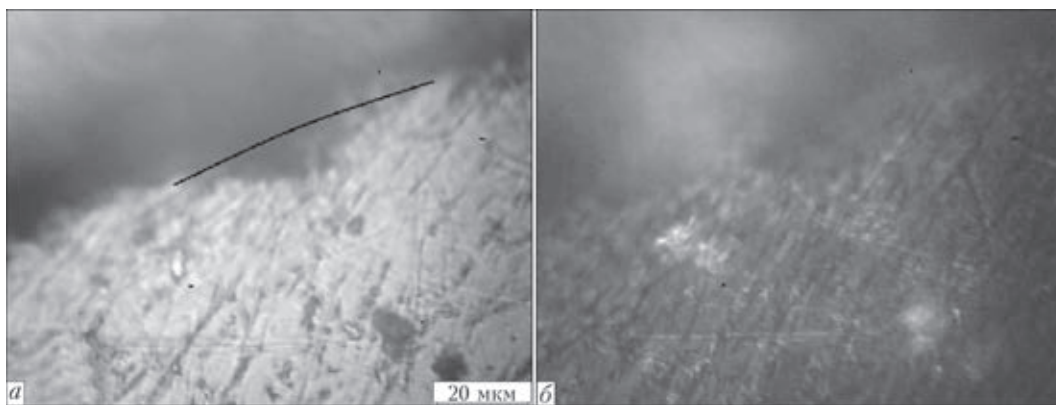


Рис. 7. Микрофотографии торцевой поверхности проволоки диаметром 3 мм в белом (а) и поляризованном (б) свете

размеры. О глубине и ширине дефектов можно судить по данным рис. 6.

Ясно, что оксиды подобных размеров не смогли сформироваться по отмеченному выше механизму. Как показал металлографический анализ поперечных микрошлифов проволоки диаметром 3 мм (рис. 7), оксиды указанных размеров существуют во внутренних объемах стали. Следовательно, исходная заготовка содержит оксиды железа, находящиеся на различном расстоянии от поверхности.

При прохождении каждой волоки на поверхность выходят оксиды, расположенные вблизи поверхности заготовки (рис. 8), тем самым увеличивая их концентрацию на поверхности. Подтверждением предложенного механизма дефектообразования является отсутствие следов пластической деформации, характерных для волочения сталей на поверхности дефектов. Следова-

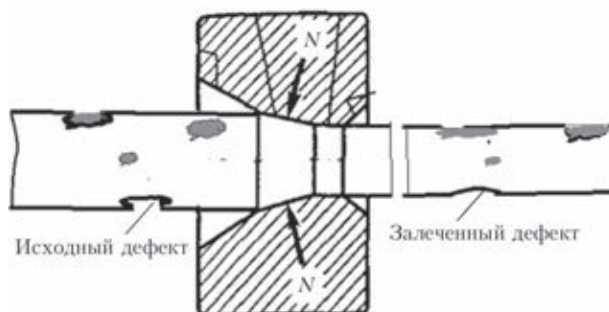


Рис. 8. Схема формирования дефектов на поверхности проволоки при волочении

тельно, волока непосредственно контактировала с оксидом.

В заключение отметим, что полировка проволоки конечного диаметра, существенно уменьшая шероховатость поверхности (рис. 9), никак не сказалась на концентрации поверхностных оксидов (рис. 10).

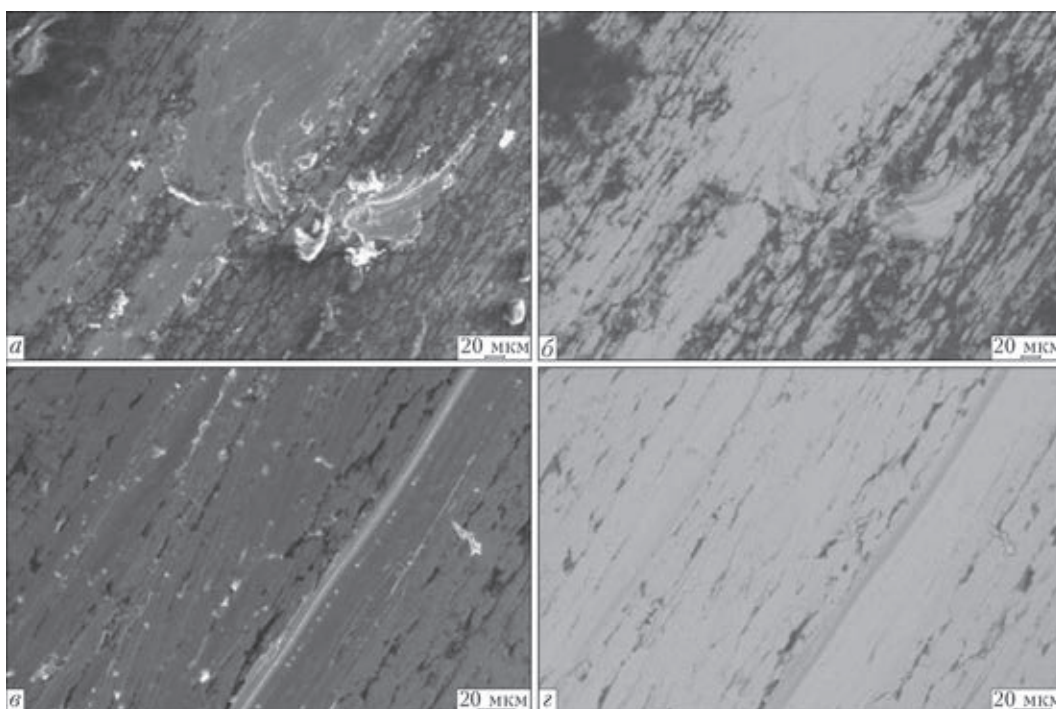
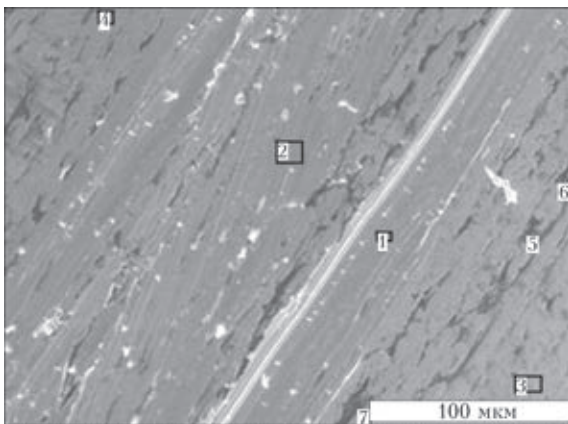


Рис. 9. Электронные микрофотографии поверхности проволоки диаметром 1 мм после волочки (а, б) и после последующего полирования (в, г)



Содержание химических элементов в спектрах полированной проволоки, мас. %

Спектр	C	O	Na	Si	Ca	Mn	Fe
1	1,40			0,80		2,29	95,52
2				1,15		1,99	96,86
3	4,93			1,19		1,80	92,08
4	1,66			0,76		1,85	95,73
5	51,89	9,75	0,51	0,47	1,86	0,75	34,77
6	48,07	8,43	0,36	0,47	1,33	0,72	40,62
7	37,59	5,41	0,43	0,27	0,78	0,99	54,52
Макс.	51,89	9,75	0,51	1,19	1,86	2,29	96,86
Мин.	1,40	5,41	0,36	0,27	0,78	0,72	34,77

Рис. 10. Результаты РСМА проволоки диаметром 1 мм после полирования

Анализ результатов проведенных исследований показал, что медное покрытие, нанесенное гальваническим способом на стальную сварочную проволоку Св-08Г2С, имеет значительное количество дефектов, которые и являются причиной разбрызгивания металла в процессе сварки.

Дефекты покрытия обусловлены двумя основными причинами — недостаточно чистой обработанной поверхностью проволоки перед нанесением покрытия и большим количеством неметаллических включений в ее поверхностном слое, концентрация которых меняется в широком диапазоне (от 20 до 40 %). Глубина залегания оксидов не превышает 20...30 мкм.

Высокая концентрация оксидов железа на поверхности проволоки окончательного диаметра обусловлена их последовательным выходом на

поверхность при прохождении волок. Полирование проволоки не сказывается на концентрации поверхностных оксидов железа.

Разработка экспериментального оборудования для лазерной обработки сварочной проволоки. Для оценки возможности удаления из поверхностного слоя сварочной проволоки неметаллических включений, которые располагаются в нем после последнего этапа волочения, проводили экспериментальные исследования, связанные с их обработкой лазерным излучением.

Известно, что инфракрасное излучение с длиной волны 10,6 мкм плохо поглощается металлами и хорошо диэлектриками (оксидами). Поэтому для избирательного удаления включений оксидов поверхность сварочной проволоки обрабатывали непрерывным излучением CO₂-лазера «Комета-2» с выходной мощностью 1200 Вт (рис. 11, а). Лазерное излучение с многомодовым распределением интенсивности TEM₂₀ фокусировалось на поверхности перемещающейся проволоки плоско-сферической линзой из КС1 с фокусным расстоянием 300 мм. При этом диаметр лазерного пучка в плоскости обработки составлял 1 мм. В зону действия лазерного пучка подавался защитный газ (аргон). Для ориентирования и перемещения сварочной проволоки относительно лазерного пучка было разработано специальное устройство, схема которого приведена на рис. 11, б. Устройство включает металлический корпус на четырех опорах 1, на котором смонтированы электрический двигатель с редуктором и принимающей кассетой 2, механизм фиксации кассеты с датчиком скорости перемещения проволоки 3. Проволока 4 принудительно с заданной скоростью сматывается с исходной кассеты 7, ориентируется направляющими роликами и подается в индуктор, где в атмосфере инертного газа с целью снятия остаточных напряжений осуществляется ее нагрев до температуры отпуска. На следующем этапе, при прохождении проволоки между следующими двумя парами роликов 5,

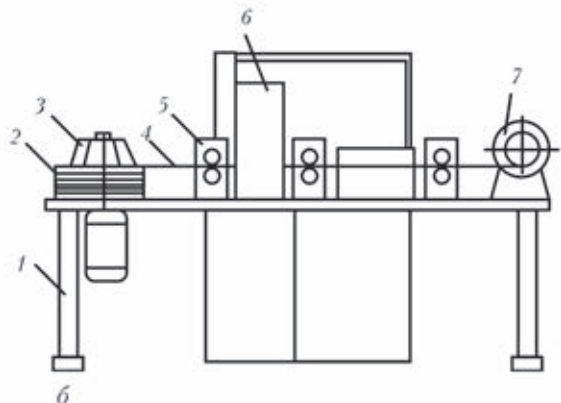


Рис. 11. Лазерная установка «Комета-2» (а) и схема устройства для ориентирования и перематки сварочной проволоки относительно лазерного пучка (б)



Рис. 12. Общий вид установки (а) и отдельных ее устройств, предназначенных для ориентирования (б) и перемотки (в) сварочной проволоки при обработке ее поверхности излучением CO_2 -лазера

которые ориентируют ее относительно оси сфокусированного лазерного луча б, производится ее облучение. В результате селективного поглощения, включения оксидов в результате испарения удаляются с поверхности проволоки. Для осуществления этой операции необходимо в станок для волочения проволоки встроить систему фокусирования лазерного излучения на базе тороидального зеркала.

Экспериментальные исследования проводили на несколько упрощенном экспериментальном стенде, общий вид которого, устройства для ориентирования и перемотки сварочной проволоки представлены на рис. 12.

Для точного базирования поверхности проволоки относительно оси лазерного пучка использовали специальные латунные фильеры. С целью исключения окисления облучаемой поверхности в зону действия лазерного пучка подавался защитный газ — аргон. Для наблюдения за процессом лазерной обработки проволоки использовали специальный микроскоп с WEB-камерой, подключенной к компьютеру, обеспечивающий 25...100-кратное увеличение изображения. Мощность лазерного излучения регулировалась в пределах 700...1200 Вт. Во время лазерной обработки проволока перематывалась с пассивной на бобину с приводом. Скорость перемещения проволоки относительно лазерного пучка менялась в диапазоне 1,5...3,5 м/мин.

Лазерной обработке подвергались два образца сварочной проволоки с диаметром 1,2 мм и длиной 10 м каждый. Один образец подвергался лазерной обработке только с одной стороны, другой — с двух противоположных сторон. В начале обрабатывалась одна сторона, затем проволока переворачивалась на 180° и облучалась другая.

В процессе лазерной обработки над облучаемой поверхностью проволоки непрерывно пульсировали вспышки увеличенной яркости, что, очевидно, обусловлено испарением оксидов.

После лазерной обработки из двух видов проволоки вырезали и исследовали образцы, которые

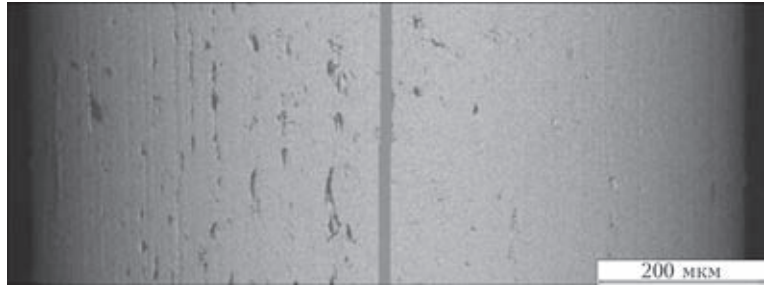


Рис. 13. Электронная микрофотография поверхности медного покрытия на проволоке, обработанной (правая сторона) и необработанной (левая) лазерным излучением

изучали методами световой и растровой электронной микроскопии. Основная часть двух образцов проволок подвергалась медиению в условиях производства.

Результаты исследования качества медного покрытия на сварочной проволоке, предварительно подвергнутой лазерной обработке. На рис. 13 приведена электронная микрофотография поверхности покрытия, включающая зону, обработанную лазерным излучением (правая сторона) и зону, не подвергавшуюся лазерной обработке (левая сторона). Видно, что предварительная лазерная обработка поверхности проволоки приводит к формированию покрытия со значительно меньшим количеством дефектов. Их наличие вблизи линии раздела (серая полоса, рис. 13 и зона 2, рис. 14) на обработанной стороне объясняется неравномерностью распределения плотности мощности излучения по цилиндрической поверхности проволоки. Центральная часть ее облученной зоны 1 (рис. 14) практически не содержит таких включений. Такая неравномерность распределения включений легко устраняется применением лазерного пучка с тороидальным распределением интенсивности.

Анализируя данные результаты, целесообразно выяснить, что представляют собой дефекты обработанной зоны, есть ли в них остатки оксидов и есть ли на дефектах обеих зон покрытие.

Для ответа на указанные вопросы проводился микрорентгеноспектральный химический анализ дефектов. Объект вращался относительно оси

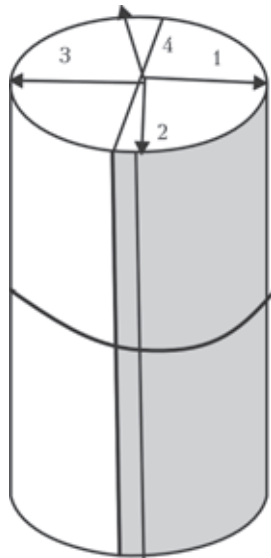


Рис. 14. Схема расположения дефектов относительно центра обработанной (1, серая) и необработанной (3, белая) поверхностей (обозначение зон 2, 4 см. в тексте) проволоки и после поворота на угол $\sim 90^\circ$ фиксировалась микрофотография дефекта и определялся его химический состав. Схема расположения дефектов на проволоке приведена на рис. 14, их

электронные микрофотографии, содержание элементов приведены на рис. 15. Результаты, полученные в зоне 4, эквивалентны зоне 3.

Изучение дефектов, редко встречающихся в центре обработанной поверхности проволоки (рис. 15, а), показало, что в них содержится незначительное количество оксидов железа, на поверхности которых осадился слой меди. Лазерная обработка периферийной части проволоки излучением меньшей интенсивности приводит к некоторому увеличению концентрации дефектов, повышению уровня содержания оксидов (рис. 15, б). На участках проволоки, не подвергавшихся лазерной обработке, концентрация дефектов на порядок выше, чем в центре облученной поверхности. Количество оксидов меняется в ней в очень широком диапазоне (от 2 до 48,55 %). При этом, на большинстве участков проволоки с оксидами медное покрытие практически отсутствует. При двухсторонней лазерной обработке участков поверхности проволоки с оксидами, а значит и без медного покрытия существенно меньше. Но на боковых поверхностях они присутствуют.

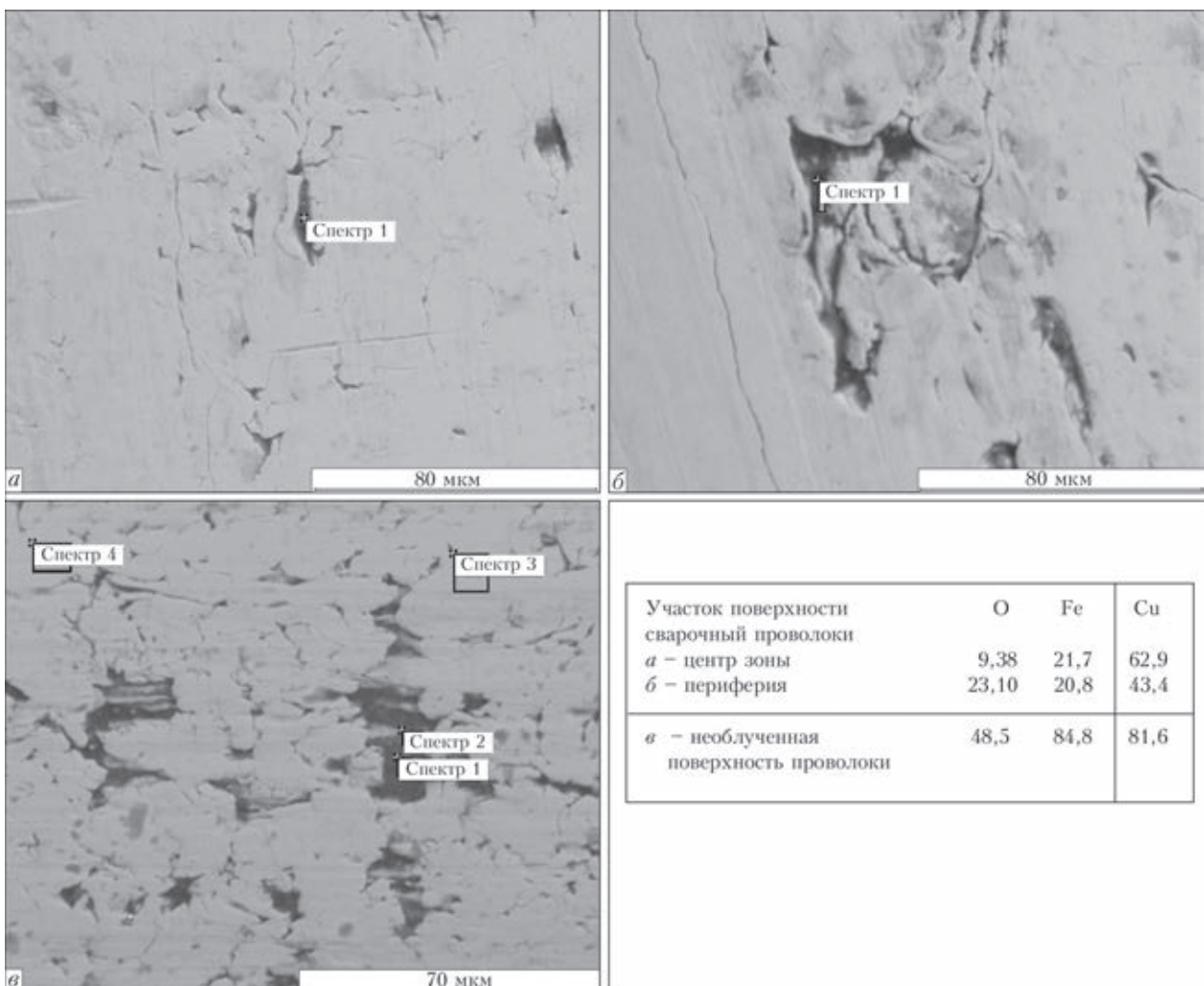


Рис. 15. Электронные микрофотографии дефектов в зоне 1 (центр облученной поверхности проволоки) (а), в зоне 2 (периферийная часть зоны) (б) и в зоне 3 (необлученная поверхность) (в)

Выводы

1. Лазерная обработка сварочной проволоки непрерывным излучением с длиной волны 10,6 мкм значительно уменьшает количество оксидов в поверхностных дефектах.

2. Освободившиеся от оксидов объемы на поверхности сварочной проволоки при последующем нанесении покрытия заполняются медью.

3. Механизм удаления оксидов — резкое увеличение их объема вследствие высокоскоростного лазерного нагрева.

4. Для равномерного удаления оксидов со всей цилиндрической поверхности проволоки целесообразно лазерное излучение фокусировать с помощью тороидального зеркала.

1. *Формирование* оптимальных свойств окалины на поверхности катанки / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, С.Ю. Жукова и др. — Бендеры: Полиграфист, 2008. — 292 с.
2. *Парусов В.В., Санюк А.Н., Сычков А.Б.* Исследование возможности более полного удаления окалины с поверх-

ности катанки перед волочением // *Металлург.* — 2004. — № 6. — С. 6–28.

3. *Парусов В.В., Сычков А.Б., Жигарев М.А.* Исследование способности к удалению окалины с поверхности катанки из стали Св-08Г2С // *Металлургическая и горнорудная пром-сть.* — 2006. — № 5. — С. 23–29.
4. *Козлов Е.И., Дехтярев В.Г., Новиков М.П.* Электрохимическая очистка поверхности проволоки Св-08Г2С // *Автомат. сварка.* — 1981. — № 9. — С.46–48.
5. *Технология* конструкционных материалов. Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркин и др.; Под ред. А.М. Дальского. — 5 изд. — М.: Машиностроение, 2004. — 512 с.
6. *Способы* изготовления медной сварочной проволоки // *Свароч. пр-во.* — 2002. — № 3. — С. 41–43.
7. *Медюшко В.А., Разоренов О.Н.* Некоторые особенности металлургического передела и применения проволоки типа Св-08Г2С при механизированных способах сварки// *Индустрия.* — 2007. — №5(32). — С. 21–23.
8. www.spectechsoyuz.com. Технологические свойства сварочной проволоки.
9. *Брандон Д., Каплан У.* Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля: Пер. с англ. — М.: Техносфера, 2004. — 312 с.
10. *Сычков А.Б., Жигарев М.А., Жукова С.Ю.* Обеспечение удаление окалины с поверхности катанки перед волочением // *Метизы.* — 2007. — № 2 (15). — С. 48–54.

Поступила в редакцию 12.05.2015

**Оборудование и современные технологии
в области плазменно-порошковой наплавки**

См. статью на с. 26–29.