

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ СВАРКИ С ПОСТОЯННОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

О.Г. ЛЕВЧЕНКО, С.Ю. МАКСИМОВ, А.О. ЛУКЬЯНЕНКО, И.В. ЛЕНДЕЛ

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проблему улучшения санитарно-гигиенических характеристик в зоне сварки решают путем разработки и оборудования рабочего места сварщика местной вытяжной, комплектации сварочных головок и держателей для механизированной сварки соплами специальной конструкции, позволяющими осуществлять отсос сварочного аэрозоля, или применения защитной маски с системой принудительной подачи очищенного воздуха. Все это дополнительно усложняет и повышает стоимость сварочного оборудования, поэтому проводятся исследования, направленные на изучение влияния энергетических параметров (тока и напряжения) процесса сварки на объемы выделения сварочных аэрозолей и их вредных составляющих. Гигиенические характеристики процесса дуговой сварки в защитных газах при постоянной подаче электродной проволоки с использованием схем управления электрическими параметрами серийных источников сварочного тока, а также импульсным управлением электрическими параметрами сварочной дуги для обеспечения переноса электродного металла хорошо изучены и представлены в технической литературе. Возможности влияния процесса сварки с импульсной подачей электродной проволоки на гигиенические характеристики изучены недостаточно. Поэтому в данной работе приведены результаты сравнительной гигиенической оценки дуговой сварки с импульсной и постоянной подачей электродной проволоки различных марок. Показаны преимущества и возможности уменьшения выделений вредных веществ в воздух рабочей зоны за счет применения сварки с импульсной подачей проволоки и выбора соответствующих параметров режимов ее подачи. Библиогр. 14, рис. 3.

Ключевые слова: дуговая сварка, механизированное оборудование, электродная проволока, импульсная подача, гигиенические характеристики, уменьшение выделений аэрозолей

Одним из путей улучшения санитарно-гигиенических характеристик дуговой сварки является применение импульсных источников питания, позволяющих снижать избыточную энергию дуги, управлять переносом электродного металла, снижать его разбрызгивание, уменьшая таким образом выделение в воздух рабочей зоны вредных веществ в составе сварочного аэрозоля (СА) [1–3]. В последнее время для дуговой сварки в защитных газах все более широкое распространение получило сварочное оборудование нового вида — автоматы и полуавтоматы с импульсной подачей электродной проволоки [4]. Так, на основе компьютеризованного вентильного быстродействующего безредукторного электропривода с полностью управляемыми параметрами импульсного движения электродной проволоки (величины скоростей в импульсе и реверсе, времени действия импульсов и пауз, частоты импульсов, величины скважности) можно повышать качество сварных соединений, управлять геометрическими параметрами сварного шва, снижать энерго- и ресурсозатраты на процесс сварки и, предположительно, снижать выделение вредных веществ в воздух рабочей зоны. Последнее остается весьма актуальной задачей при решении проблемы защиты сварщика и окружающей среды от неизбежных

вредных выделений СА, особенно при применении легированных электродных проволок [5–7].

Целью настоящей работы является определение возможностей влияния способа дуговой сварки с управляемой импульсной подачей электродной проволоки на гигиенические характеристики процесса сварки и выбор режимов, обеспечивающих снижение выделений вредных веществ.

Для поиска путей снижения выделений вредных веществ, загрязняющих воздух производственной среды при механизированной сварке, проведены исследования влияния импульсной подачи электродной проволоки и режима сварки на показатели выделения СА, образующихся при выполнении процесса в смеси защитных газов (82 % Ar + 18 % CO₂) проволоками сплошного сечения марок Св-08Г2С, Св-01Х19Н18Г10АМ4 (ЭП-690) диаметром 1,2 мм и в CO₂ порошковой проволокой Велтек-Н320 диаметром 1,6 мм, содержащей хром, никель, марганец, фториды и другие компоненты. Исследовали зависимости интенсивности образования СА и их основных токсических компонентов от режима сварки с импульсной подачей электродной проволоки. Применяли сварку с импульсной подачей электродной проволоки и (для сравнения) с непрерывной подачей проволок сплошного сечения на режиме 160 А и 21...22 В и порошковой проволо-



ки на режиме 230 А и 26...27 В. В исследованиях частота импульсов f подачи электродной проволоки принимала значения 20, 40, 60 Гц и скважность импульсов s — 2, 3, 5 ед. Постоянная подача электродной проволоки задавалась частотой 1 Гц при скважности 1 ед [8]. Защитные газы выбирали по рекомендациям производителей электродной проволоки, а режимы сварки — из рекомендуемых диапазонов тока и напряжения в зависимости от типа электродной проволоки и ее диаметра [9].

Определение гигиенических показателей выделений СА выполнялось в соответствии со стандартом [10]. Исследования интенсивности выделения СА проводились методом «полного улавливания». Для определения химического состава СА пользовались методами санитарно-химического анализа [11].

Сварка проволокой Св-08Г2С в смеси Ar + CO₂. Результаты исследований (рис. 1, а) показали, что при сварке с постоянной подачей электродной проволоки Св-08Г2С наблюдается максимальная интенсивность образования СА. При применении всех других режимов сварки с импульсной подачей она уменьшается в 1,2...2 раза.

Исследование зависимостей интенсивности образования СА от частоты и скважности импульсов при сварке проволокой Св-08Г2С в смеси защитных газов Ar + CO₂ (рис. 1, а) определило, что они имеют сложный вид. Так, при сварке на частоте импульсов 20 Гц интенсивность образования СА уменьшается с ростом скважности импульсов, на частоте 40 Гц, наоборот, увеличивается, а на частоте 60 Гц данная зависимость неоднозначна.

Сложный вид полученных зависимостей можно объяснить следующим образом. Известно, что при сварке с постоянной подачей электродной проволоки в защитном газе уровень выделений СА определяется не только мощностью дуги, но и характером переноса электродного металла [12]. При этом зависимость интенсивности образова-

ния СА от сварочного тока носит экстремальный характер: сначала увеличивается, потом снижается, имеет максимум, соответствующий наибольшему разбрызгиванию электродного металла, и минимум, характерный для мелкокапельного переноса без коротких замыканий с погружением дуги в основной металл [13]. В свою очередь известно [14], что при импульсной подаче электродной проволоки в зависимости от шага подачи возможны три варианта переноса электродного металла:

- шаг подачи равен или несколько больше длины дуги, и капля окунается в ванну во время движения электрода;
- шаг подачи несколько меньше длины дуги, и капля электродного металла, не оторвавшись, входит в контакт со сварочной ванной уже после торможения под действием сил инерции;
- шаг подачи меньше длины дуги, и капля отрывается под действием сил инерции и пролетает дуговой промежуток без короткого замыкания.

Поэтому вид диаграммы (рис. 1, а) зависит от того, какой участок зависимости интенсивности образования СА от сварочного тока и имеющегося варианта переноса электродного металла в данный момент рассматривается.

Как известно, сварка модулированным импульсным током позволяет снизить интенсивность выделения СА (по сравнению со сваркой непрерывным током) без снижения производительности и коэффициента расплавления [1, 3]. Уменьшение общей мощности дуги за счет пауз при применении импульсного тока снижает избыток энергии, имеющий место при сварке непрерывным током и идущий на испарение расплавляемых материалов. Интенсивность образования СА снижается с уменьшением токов в импульсе, паузе, длительности импульса и с увеличением длительности паузы. Механизированная сварка импульсным током позволяет снизить интенсивность выделения СА

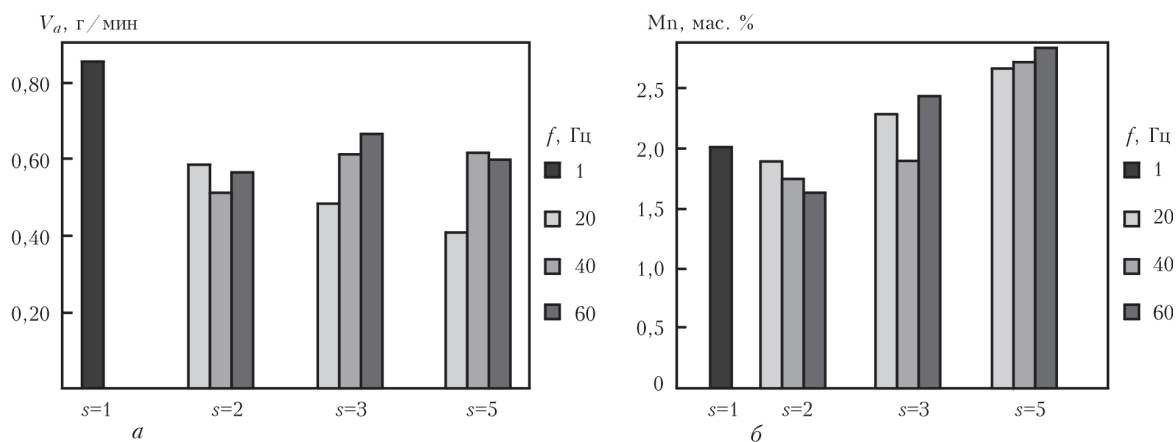


Рис. 1. Показатели выделений СА при сварке проволокой Св-08Г2С на среднем токе 160 А и напряжении 21...22 В с постоянной подачей электродной проволоки ($f=1$ Гц, $s=1$ ед.); с импульсной подачей проволоки ($f=20, 40, 60$ Гц, $s=2, 3, 5$): а — интенсивность образования СА (V_a); б — содержание марганца в составе СА (в мас. %)

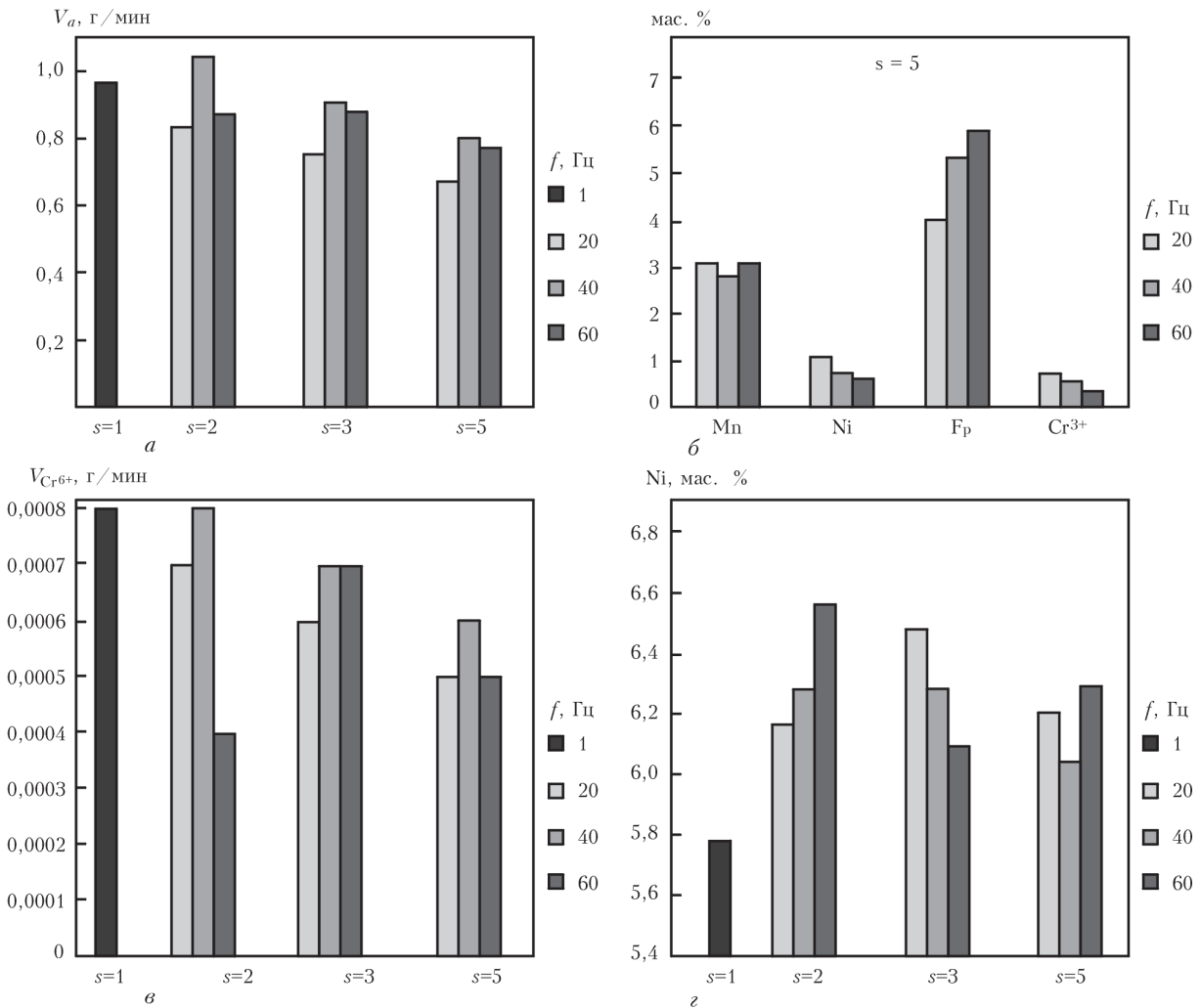


Рис. 2. Показатели выделений СА при сварке проволокой ЭП-690, полученные на среднем токе 160 А и напряжении 21...22 В с постоянной подачей электродной проволоки ($f=1$ Гц, $s=1$ ед.); с импульсной подачей проволоки ($f=20, 40, 60$ Гц, $s=2, 3, 5$ ед.): а — интенсивность выделения СА V_a ; б — массовая доля Mn, Cr³⁺, Fp и Ni в составе СА (для $s=5$ ед.); в — интенсивность образования шестивалентного хрома V_{Cr6+} ; з — массовая доля никеля в составе СА

по сравнению с традиционной механизированной дуговой сваркой вследствие уменьшения количества тепла, выделяемого в зоне сварки.

Кроме того, применение сварки импульсным током позволяет значительно снизить выделение марганца в составе СА [12] путем обеспечения процесса с управляемыми принудительными короткими замыканиями, увеличения частоты замыканий, уменьшения длины дуги и размера капель. Снижать содержание марганца в СА можно регулированием частоты импульсов тока, способствующих лучшему отрыву капли от электрода и увеличению частоты их перехода в ванну. Результаты исследований, полученные в данной работе, хорошо согласуются с результатами других работ по вопросу механизированной сварки модулированным импульсным током [2, 3, 12, 14].

Результаты сравнительных исследований содержания токсичного марганца в СА, образующихся при сварке проволокой Св-08Г2С с постоянной и импульсной подачей (рис. 1, б) показывают, что минимальное его содержание име-

ет место при импульсной подаче электродной проволоки на режимах $f=20, 40, 60$ Гц, $s=2$ ед. Остальные режимы сварки $f=20, 40, 60$ Гц, $s=3$ и 5 ед. приводят к некоторому повышению содержания марганца в составе СА по сравнению со сваркой с непрерывной подачей проволоки.

Исследование зависимостей содержания марганца в составе СА (рис. 1, б) и интенсивности его выделения от частоты и скважности импульсов подачи электродной проволоки показали, что увеличение скважности импульсов способствует повышению концентрации марганца в СА и интенсивности его выделения, влияние частоты импульсов — неоднозначно. При сварке с импульсной подачей электродной проволоки с частотой импульсов 40...60 Гц уменьшение величины скважности импульса с 5 до 2 ед. дает возможность снизить содержание токсичного марганца в составе СА и интенсивность его выделения почти в 2 раза.

Таким образом, результаты исследований зависимости интенсивности выделения марганца, как ведущего токсичного компонента при сварке проволо-



кой Св-08Г2С, позволяют выбрать режимы сварки, которые обеспечивают минимальное поступление марганца в воздух рабочей зоны. Это режим сварки с импульсной подачей электродной проволоки с частотой 40...60 Гц и скважностью 2 ед.

Сварка проволокой ЭП-690 в смеси Ag + CO₂. При применении для сварки проволоки ЭП-690 с ее импульсной подачей интенсивность образования СА ниже, чем во время сварочного процесса с постоянной подачей проволоки, кроме режима $f = 40$ Гц, $s = 2$ ед. (рис. 2, а). Использование проволоки ЭП-690 приводит к выделению в воздух рабочей зоны таких вредных компонентов как марганец, трехвалентный хром, никель (рис. 2, б), а также шестивалентный хром. В составе СА наиболее высокое содержание имеет марганец, меньшее — трехвалентный хром, никель и минимальное — шестивалентный хром. В данном случае наиболее токсичным компонентом СА является шестивалентный хром, результаты исследований интенсивности выделений которого приведены на рис. 2, в. Из указанного рисунка следует, что при сварке с импульсной подачей электродной проволоки (кроме режима $f = 40$ Гц, $s = 2$ ед.) интенсивность выделения шестивалентного хрома более низкая, чем при постоянной подаче проволоки. Максимальная интенсивность выделения шестивалентного хрома отмечается на режиме сварки с частотой 40 Гц и скважностью 2 ед. по сравнению с остальными режимами сварки с импульсной и постоянной подачей проволоки. Наиболее приемлемым режимом, обеспечивающим минимальное выделение шестивалентного хрома (в 2 раза меньше, чем при сварке с постоянной подачей проволоки), является режим с импульсной подачей проволоки с частотой 60 Гц и скважностью 2 ед.

Что касается никеля (второго по величине токсичности канцерогенного компонента СА), то по результатам исследований (рис. 2, г) видно, что его содержание в СА при сварке проволокой ЭП-690 наоборот имеет минимальное значение на режиме с постоянной подачей проволоки по сравнению со сваркой с импульсной подачей проволоки на всех исследованных режимах. Результаты исследований зависимости интенсивности выделения никеля от режима сварки с импульсной подачей проволоки показали, что она минимальна на режиме с частотой 20 Гц и скважностью 5 ед., а максимальна — на режиме с частотой 40 Гц и скважностью 2 ед. Это рекомендуется учитывать при выборе оптимального режима сварки, когда ведется учет интенсивности выделения в воздух рабочей зоны всех компонентов СА. При этом следует помнить, что по величине предельно допустимой концентрации (ПДК) токсичность шестивалентного хрома в 5 раз выше, чем токсичность

никеля и многократно превышает ПДК других компонентов в составе СА.

Сварка порошковой проволокой Велтек-Н320 в CO₂. При сварке порошковой проволокой Велтек-Н320, в состав которой кроме упомянутых выше компонентов также входят фториды, применение импульсного режима в большинстве случаев позволяет улучшить гигиенические характеристики по сравнению со сваркой с постоянной подачей проволоки, особенно на режимах с частотой 20 Гц при любой скважности (рис. 3, а).

Результаты исследований зависимостей интенсивности образования СА от частоты и скважности импульсов (рис. 3, а) показали, что при скважности 2, 3 и 5 ед. при частоте 20 Гц она имеет минимальное значение, далее на частоте 40 Гц достигает максимума и затем снижается до 60 Гц, за исключением режима со скважностью 2 ед., где после частоты импульсов 40 Гц, интенсивность образования СА продолжает расти. Определение химического состава СА (рис. 3, б) показало, что в нем в наибольшем количестве содержатся фториды нерастворимые (61,4 %), за ними следуют фториды растворимые (18,0 %), далее — марганец (13,9 %), никель (5,0 %) и в наименьшем количестве содержится трехвалентный хром (3,4 %). Что примечательно, шестивалентный хром в данном случае отсутствует. Минимальное содержание токсичного марганца в составе СА было при сварке с импульсной подачей проволоки на режиме $f = 40$ Гц, $s = 2$ ед. и максимальное — при сварке с постоянной подачей (рис. 3, в).

Исследования зависимостей интенсивности выделения марганца от частоты и скважности импульсов показали, что они также имеют сложный характер: на частотах импульсов 20 и 60 Гц имеют практически одинаковые значения; на частоте 40 Гц при скважности 5 ед. интенсивность выделения марганца имеет максимальное значение, а при скважности 2 ед. — минимальное. Последнее подтверждают ранее полученные данные [2] о том, что сварка импульсным током позволяет снизить содержание марганца в СА за счет управления переносом электродного металла.

Определение выделений растворимых фторидов (2 класс опасности) показывает, что его максимальное содержание было в СА, образующихся при сварке с импульсной подачей проволоки на режимах с частотой 40 и 60 Гц и скважностью 2, 3 и 5 ед.; более низкое — при сварке с постоянной подачей проволоки и с импульсной подачей на частоте 20 Гц и скважностях 2, 3, 5 ед. (рис. 3, г). Исследования зависимостей интенсивности образования растворимого фтора от частоты и скважности импульсов показали, что при сварке со скважностью 3 и 5 ед. на частотах от 20 до



40 Гц она возрастает, а от 40 до 60 Гц снижается, за исключением скважности 2 ед., где интенсивность образования растворимого фтора постоянно растет. Фтор нерастворимый (3 класс опасности) в максимальном количестве присутствует в СА в случае сварки с постоянной подачей электродной

проволоки и в значительно меньших количествах при сварке с импульсной подачей проволоки на всех режимах (рис. 3, д).

Исследование содержания никеля (1 класс опасности) в СА (рис. 3, е), как ведущего токсичного компонента в данном случае, показало, что

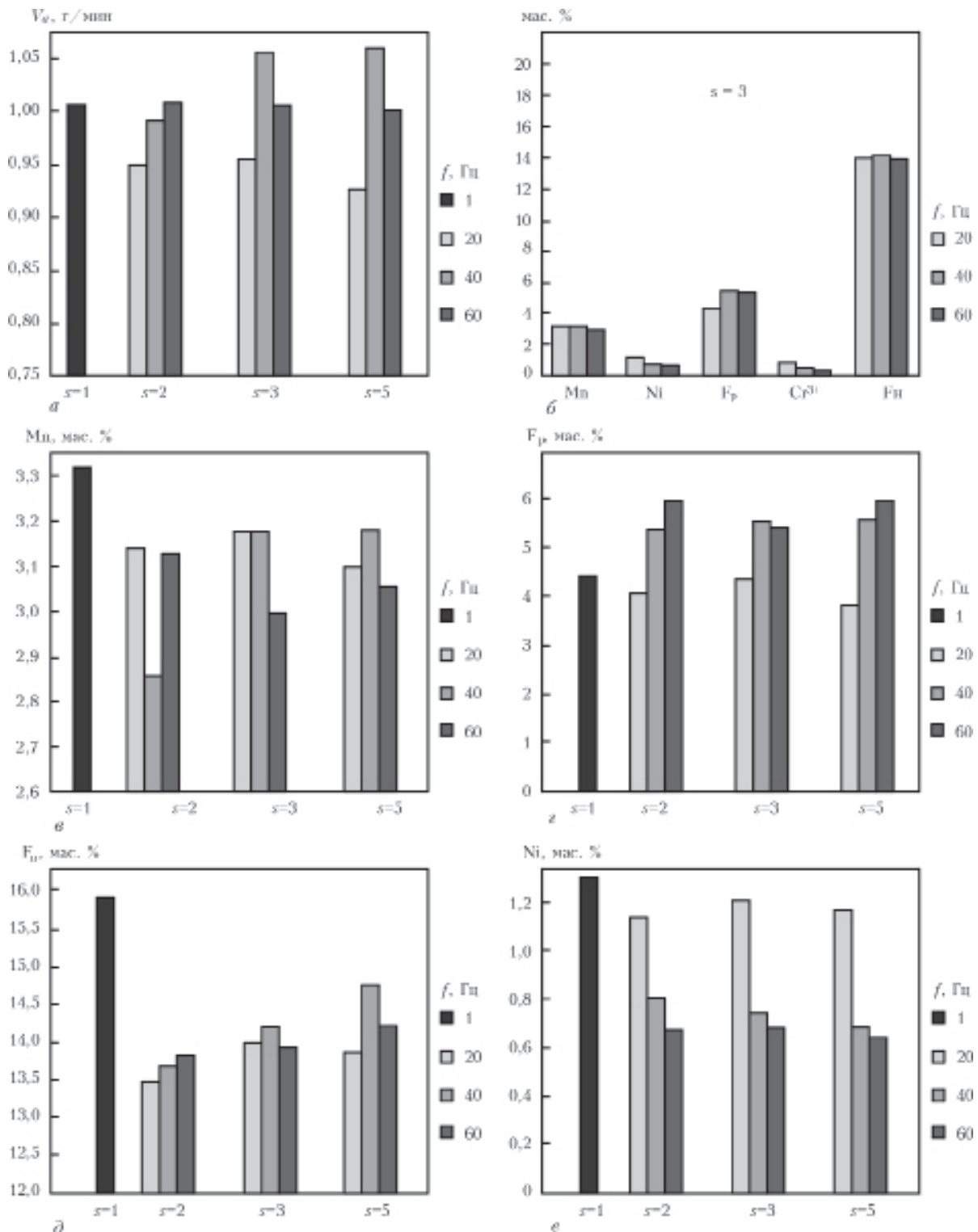


Рис. 3. Показатели выделений СА при сварке проволокой Велтек-Н320, полученные на среднем токе 230 А и напряжении 26...27 В с постоянной подачей электродной проволоки ($f=1$ Гц, $s=1$ ед.); с импульсной подачей проволоки ($f=20, 40, 60$ Гц, $s=2, 3, 5$ ед.): а — интенсивность образования СА (V_a); б — массовая доля вредных веществ в составе СА (при скважности 3 ед.); в — массовая доля Mn в составе СА; г — массовая доля растворимого фтора F_p в СА; д — массовая доля нерастворимого фтора F_n в СА; е — массовая доля Ni в СА



его минимальное количество было при сварке с импульсной подачей порошковой проволоки на режимах с частотой 40 и 60 Гц и скважностью 2, 3 и 5 ед., а максимальное — при сварке с постоянной подачей проволоки, а также на режимах с импульсной подачей проволоки с частотой 20 Гц и скважностях 2, 3, 5 ед. Зависимости интенсивности выделения никеля от частоты импульсов снижаются с ее увеличением. Поэтому в данном случае (при отсутствии шестивалентного хрома в СА) при выборе режимов сварки, обеспечивающих минимальное воздействие СА на организм сварщика, следует ориентироваться на никель.

Таким образом, по полученным данным установлено, что интенсивность образования СА, количество выделяемых примесей и их массовая доля в составе СА весьма чувствительны к изменению напряжения в пределах $\pm 1,5 \dots 2$ В, которое происходит при импульсной подаче электродной проволоки. Она зависит от вида переноса электродного металла, типа электродной проволоки и уровня ее легирования. Применение импульсной подачи электродной проволоки позволяет управлять не только размером расплавленной капли через шаг подачи, но также задавать тип переноса электродного металла. Так, при использовании порошковой проволоки Велтек-Н320 на режимах с частотой 40 и 60 Гц и скважностью 2, 3 и 5 ед. наблюдался струйный перенос с частой модуляцией длины дуги и, как следствие, ее напряжения, что в итоге привело к уменьшению содержания паров никеля (наиболее низкое выделение никеля обеспечивается на режимах с импульсной подачей проволоки при частоте 40 и 60 Гц). Переход к крупнокапельному переносу с короткими замыканиями при частоте импульсов 20 Гц не изменил существенно уровень содержания никеля по сравнению с постоянной подачей электродной проволоки, зато повлиял на скорость образования СА и содержания в нем паров других соединений. В случае же со сплошной электродной проволокой ЭП-690 возможность ее импульсной подачи влияет на тип переноса электродного металла и позволяет на скважности 5 ед. и частоте 20 Гц получать стабильный процесс с короткими замыканиями, что в итоге положительно сказывается на интенсивности образования СА и уменьшении интенсивности выделения шестивалентного хрома примерно в 2 раза. Такие же закономерности, связанные с влиянием параметров импульсной подачи электродной проволоки на объем капли, длительность ее пребывания на торце электродной проволоки, длительность перехода капли в сварочную ванну, наблюдаются и в случае сварки электродной проволокой Св-08Г2С. При сварке с импульсной подачей электродной проволо-

ки Св-08Г2С в смеси защитных газов $Ag + CO_2$ интенсивность выделения СА уменьшается от 1,2 до 2 раз по сравнению со сваркой с непрерывной подачей проволоки.

Из всего выше сказанного следует, что сварка с управляемой импульсной подачей электродной проволоки улучшает гигиенические характеристики этого процесса по сравнению со сваркой с непрерывной подачей и до некоторой степени дает возможность управлять ими при точной настройке параметров импульсной подачи электродной проволоки и всего комплекса сварочного оборудования. Полученные результаты исследований рекомендуются использовать при выборе режимов сварки с управляемой импульсной подачей электродной проволоки.

1. *Интенсивность образования аэрозолей при ручной сварке модулированным током / А.П. Головатюк, В.С. Сидорук, О.Г. Левченко и др. // Автомат. сварка. – 1985. – № 2. – С. 39–40.*
2. *Левченко О.Г. Образование аэрозолей при сварке в CO_2 модулированным током // Там же. – 2000. – № 8. – С. 48–50.*
3. *Harvey R. Castner. Gas metal arc welding using pulsed fume generation current. WELDING RESEARCH SUPPLEMENT. – February, 1995. – P. 59–68.*
4. *Лебедев В.А. Особенности управления процессом сварки плавящимся электродом с импульсной подачей электродной проволоки // Сварка и Диагностика. – 2014. – № 1. – С. 16–18.*
5. *Winifred G. Palmer, James C. Eaton. Effects of welding on health, XIII // American Welding Society. – 2007. – International Standard Book Number: 978-0-87171-067-3.*
6. *James M. Antonini. Health effects of welding // Critical reviews in toxicology. – 2003. – 33(1). – P. 61–103.*
7. *ANSI Z49.1-2005. «Safety in welding, cutting and allied processes», Section E5.4 pg 12. American Welding Society, 550 N. W. LeJeune Road, Miami, FL, 2005.*
8. *Лебедев В.А., Лендел И.В. Управление импульсным движением электродной проволоки при механизированной сварке за счет изменения шага подачи // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 3. – С. 10–14.*
9. *Потапьевский А.Г., Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография; Юргинский технологический ин-т. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2012. – 208 с.*
10. *ДСТУ ISO 15011-1:2008. Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесях. Лабораторний метод відбирання аерозолів і газів, утворюваних під час дугового зварювання. Частина 1. Визначення рівня виділень і відбір проб для аналізу мікрочастинок аерозолів. – [Чинний від 2008-08-15]. – Київ: Держспоживстандарт України, 2011. – 8 с.*
11. *Методические указания по определению вредных веществ в сварочном аэрозоле (твердая фаза и газы): Методические рекомендации № 4945-88. – М.: Минздрав СССР, 1990. – 150 с.*
12. *Левченко О.Г. Влияние состава защитного газа и режимов сварки на валовые выделения сварочного аэрозоля // Автомат. сварка. – 1986. – № 1. – С. 73–74.*
13. *Воропай Н.М. Бенидзе З.Д. Бучинский В.Н. Особенности процесса сварки в CO_2 с импульсной подачей электродной проволоки // Там же. – 1989. – № 2. – С. 23–26, 36.*
14. *Левченко О.Г. Влияние технологических режимов сварки в CO_2 конструкционных сталей на выделение аэрозоля // Там же. – 1992. – № 9-10. – С. 31–33.*

Поступила в редакцию 06.07.2015