

DOI: 10.15593/2224-9877/2015.3.08

УДК 621.791.75

И.Ю. ЛетягинПермский национальный исследовательский
политехнический университет, г. Пермь, Россия

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ГОРЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ ПРИ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

На сегодняшний день сохраняется большой объем применения ручной дуговой сварки покрытыми электродами. Особенно актуальным является применение этого способа сварки для выполнения ремонтных и восстановительных работ, связанных с исправлением дефектов сварки, возникающих при изготовлении металлоконструкций. В данных условиях особенно актуальным является обеспечение высокой стабильности горения дуги. За последние годы заметно увеличился объем исследований, связанных с созданием новых сварочных материалов, обеспечивающих более высокие сварочно-технологические свойства новых электродов, такие как стабильность горения дуги, устойчивость повторного возбуждения дуги, экологические показатели и др. Однако существующие методы оценки свойств электродов не всегда обеспечивают возможность анализа влияния состава покрытия на стабильность горения дуги. Так, большинство существующих методик оценки стабильности горения сварочной дуги ориентированы на сварку на переменном токе и не позволяют оценить влияние состава покрытия электродов на стабильность горения сварочной дуги. В связи с этим актуальной является разработка методик оценки стабильности горения дуги, позволяющих исследовать влияние компонентов электродного покрытия на сварочно-технологические характеристики электрода для создания сварочных материалов с повышенным уровнем свойств.

Исследования стабильности горения сварочной дуги постоянного тока, проводимые на кафедре сварочного производства и технологии конструкционных материалов ПНИПУ, предусматривают анализ динамических характеристик сварочного тока и напряжения на дуге, записанных в память персонального компьютера с использованием специальной информационно-измерительной системы. С целью исключения случайных возмущений, вызываемых человеческим фактором, для проведения экспериментов используется сварочный автомат типа АДС-1000-2 системы АРНД, в котором электродная проволока была заменена штангой с электродным зажимом на конце для сварки покрытыми электродами.

В момент сварки исследуемыми электродами проводится запись сварочного тока и напряжения дуги, колебания которых характеризуют изменение сопротивления дугового промежутка, что связано с устойчивостью горения дуги, характером переноса металла, наличием коротких замыканий и в целом с устойчивостью всего процесса. Последующая математическая обработка динамических характеристик сварочной дуги позволяет оценить стабильность горения сварочной дуги на основе коэффициента вариации. Кроме того, данная методика позволила выявить и количественно оценить влияние типа источника питания дуги и состава покрытия электрода на устойчивость процесса сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, электродное покрытие, динамические характеристики сварочной дуги, стабильность горения, коэффициент вариации.

I.Iu. Letiagin

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

ASSESSMENT OF STABILITY OF BURNING OF A WELDING ARCH WHEN WELDING BY THE COVERED ELECTRODES

Today large volume of application of manual arc welding by the covered electrodes remains. Application of this way of welding for performance of the repair and recovery work connected with correction of the defects of welding arising at production of a metalwork is especially actual. In these conditions ensuring high stability of burning of an arch is especially actual. In recent years considerably the volume of the researches connected by creation of the new welding materials providing higher welding and technological properties of new electrodes such as stability of burning of an arch, stability of repeated excitement of an arch, ecological indicators, etc. increased. However the existing methods of an assessment of properties of electrodes not always provide possibility of the analysis of influence of structure of a covering on stability of burning of an arch. So the majority of the existing techniques of an assessment of stability of burning of a welding arch are oriented on welding on alternating current and don't allow to estimate influence of structure of a covering of electrodes on stability of burning of a welding arch. In this regard development of the techniques of an assessment of stability of burning of an arch allowing to investigate influences of components of an electrode covering on welding technical characteristics on an electrode for creation of welding materials with the increased level of properties is actual.

The researches of stability of burning of a welding arch of a direct current conducted on Department "Welding Production and Technology of Structural Materials", Perm National Research Polytechnic University provide the analysis of dynamic characteristics of welding current and tension on an arch which is written down in memory of the personal computer with use of special information and measuring system. For the purpose of an exception of casual indignations of the experiments caused by a human factor for carrying out the welding ADS-1000-2 machine gun of system of automatic control of tension of an arch in which the electrode wire was replaced with a bar with an electrode clip on the end for welding by the covered electrodes is used.

At the time of welding the studied electrodes carry out record of welding current and tension of an arch which fluctuations characterize change of resistance of an arc interval that is connected with stability of burning of an arch, nature of transfer of metal, existence of short circuits and, in general, with stability of all process. The subsequent mathematical processing of dynamic characteristics of a welding arch allows to estimate stability of burning welding arches on the basis of variation coefficient. Besides this technique allowed to reveal and quantitatively to estimate influence like the power supply of an arch and structure of a covering of an electrode on stability of process of welding.

Keywords: arc welding, electrode covering, dynamic characteristics of a welding arch, stability of burning, variation coefficient.

Для того чтобы дуга могла использоваться для сварки металла, она должна иметь необходимые энергетические характеристики и достаточную устойчивость горения.

Под термином «устойчивость» обычно понимается способность дуги к продолжительному горению после ее зажигания [1]. Режим горения дуги, который существует в течение неограниченного времени в отсутствии возмущений и характеризуется каким-либо отличным при-

знаком, называется равновесным. Если отклонение режима от исходного равновесия под действием возмущений в течение интересующего нас времени не превышает допустимого значения, то равновесный режим считается устойчивым по отношению к данным возмущениям.

При анализе устойчивости обычно удовлетворяются знанием лишь интегральных величин, таких, например, как напряжение и ток дуги, определяющих ее энергетическое состояние, и аналогичных величин, определяющих ее пространственное положение, форму и движение (длина, диаметр, скорость перемещения). Соответственно, при этом говорят об энергетической или пространственной устойчивости [2, 3].

Устойчивость дуги определяется следующими условиями: способностью внешней цепи поддерживать напряжение, необходимое для горения разряда, и способностью эмиссионных процессов, обеспечивающих ток на катоде дуги, протекать в условиях ограниченного тока, величина которого определяется параметрами цепи. Для дуг в любых средах, кроме вакуума, важны оба эти условия.

В дуге полное падение напряжения на разряде может стать большим и достичь величины напряжения внешней цепи. Тогда условие устойчивости ее горения не будет выполняться и разряд должен погаснуть.

Процессы в дуге можно в определенной мере стабилизировать (повысить устойчивость горения дуги и уменьшить разбрызгивание металла) соответствующим выбором электрических параметров источников тока и сварочной цепи, что достигается установлением определенной формы вольт-амперной характеристики источника тока и его динамических свойств. Возможности такой стабилизации подробно исследованы Б.Е. Патонем и В.К. Лебедевым [1], В.П. Никитиным, И.Я. Рабиновичем [4], В.К. Лебедевым и М.Н. Сидоренко [5], И.И. Зарубой [6], Ф.Г. Потапьевским, Д.Б. Кейтом и др. Этот способ можно назвать внешним способом регулирования технологических свойств дуги. Другой способ заключается в активном воздействии на процессы сварки в самой дуге путем введения в дугу различных веществ, которые можно разделить на три группы: легкоионизируемые (в первую очередь щелочные), электроотрицательные и элементы, повышающие эмиссионную способность электродов.

Введение в состав электродного покрытия веществ с низким потенциалом ионизации способствует улучшению устойчивости горения дуги. Изучение влияния ионизаторов на устойчивость электрической сварочной

дуги привело к мнению о том, что решающее влияние на повышение стабильности имеют пары ионизаторов, попавшие в столб дуги. Пары обеспечивают повышение степени ионизации плазмы и повышают электропроводность столба. Однако не все имеющиеся экспериментальные факторы подтверждают такую точку зрения. Г.М. Тихоедов в одной из своих ранних работ о роли ионизаторов и деионизаторов в сварочной дуге утверждал, что стабильность горячей дуги постоянного тока определяется не ионизацией столба, а эмиссионной способностью катода дуги: вещества, улучшающие эмиссию, повышают устойчивость [7].

В случае сварочной дуги существует множество возмущающих факторов: колебания напряжения, определяемые источником питания; непрерывное перемещение дуги на новые участки свариваемого изделия; перенос и плавление металла; неравномерность и неоднородность потока частиц, поступающих в межэлектродный промежуток, и т.д.

Наличие легкоионизируемых элементов в атмосфере дугового разряда стабилизирует положение катодного пятна и изменяет характер разряда, позволяя при достаточной их концентрации получать диффузионную привязку разряда на катоде, что существенно влияет на характер плавления и переноса электродного металла [8].

Первые попытки объяснить механизм действия легкоионизируемых добавок на стабильность дуги и перенос электродного металла предпринимались еще в 1936–1938 гг. По мнению П.П. Буштедта, а также авторов более поздних работ [9], положительное влияние стабилизирующих веществ вызвано усилением электронной эмиссии на катоде вследствие уменьшения работы выхода электронов.

Согласно другой гипотезе, разработанной К.К. Хреновым [10] и Г.И. Лесковым [8], действие стабилизирующих элементов на устойчивость дуги обусловлено испарением используемого вещества, диссоциацией продуктов испарения в дуге и термической ионизацией газов и металлических паров. Такое действие обусловлено тем, что атомы щелочных элементов при нахождении их в межэлектродном промежутке благодаря большим сечениям столкновений с электронами [11] раньше остальных воспринимают энергию электрического поля, получаемую от электронов при столкновениях с ними. Как отмечал И.В. Кирдо [12], повышение стабильности дуги переменного тока возможно путем воздействия на каждый из двух процессов, определяющих ход повторного зажигания дуги, на процесс ионизации в объеме газа и на величину оста-

точной термоэлектронной эмиссии. На увеличение длительности существования остаточной проводимости межэлектродного промежутка, являющейся характеристикой устойчивости дуги, как в результате введения в ее столб паров легкоионизируемых элементов, так и при повышении эмиссионной способности, указывалось и Г.И. Лесковым [8]. Поэтому представляется, что при отсутствии достаточных экспериментальных данных обе гипотезы не следует противопоставлять одну другой. Вероятнее всего, гипотезы излагают различные проявления одного и того же процесса поддержания горения дуги и в разной мере оказывают влияние в зависимости от конкретных условий.

Стабильность дуги переменного тока в целом определяется характером изменения электрических параметров межэлектродного промежутка от момента перехода тока через нуль до момента зажигания, их величиной и воспроизводимостью в каждом последующем полупериоде. Стабильный процесс сварки на переменном токе характеризуется небольшими пиками напряжения зажигания в начале каждого полупериода или даже их полным отсутствием [1], относительно большим преддуговым током и скоростью его нарастания [8], более высокой проводимостью и длительностью существования остаточной плазмы [8, 12].

Признаками нестабильного процесса являются высокое значение напряжения зажигания, величина которого может достигать напряжения холостого хода источника питания (крайний случай, дуга не возникает), небольшой преддуговой ток и малая скорость его нарастания, низкая проводимость остаточной плазмы.

На протяжении многих лет исследователи пользовались полуколичественными оценками стабильности процесса в непосредственной связи с исследуемыми сварочными материалами или источниками питания. Е.М. Кузьмак предложил характеризовать стабилизирующие свойства электродов коэффициентом стабильности, учитывающим частоту естественных обрывов дуги при сварке на переменном токе [13]. Благодаря простоте подобная методика используется иногда и другими исследователями. В.П. Лугин усовершенствовал эту методику, применив специальное устройство для автоматического поджигания дуги после ее обрыва [14].

Широкое распространение при исследовании стабильности горения сварочной дуги получила методика К.К. Хренова [10], основанная на определении среднего значения длины дуги в момент обрыва при много-

кратном повторении одного и того же эксперимента. Испытуемый электрод закрепляется вертикально в штативе, конец электрода находится на расстоянии около двух миллиметров от пластины основного металла. После установки электрода включают сварочный ток и зажигают дугу, замкнув электрод на пластину угольным стержнем. Дуге дают догореть до ее естественного обрыва, который наступает вследствие возрастания длины дуги по мере плавления электрода. Чем больше удастся удлинить дугу до ее обрыва, тем устойчивей процесс. Способностью дуги к значительному удлинению называют эластичностью, которая зависит не только от свойств дуги, но и от характеристик источника питания.

Данная методика оценивала эластичность дуги при ее сравнительно плавном и медленном удлинении. В реальном процессе могут наблюдаться и скачкообразные изменения длины дуги, вызванные как вертикальными, так и горизонтальными движениями электрода. В этом случае необходимо также учитывать и динамические свойства источника, в частности значение индуктивности в его цепи. После отрыва капли от электрода длина дуги увеличивается скачкообразно, что приводит к резкому увеличению напряжения и снижению тока. Обрыв дуги, как правило, происходит именно в момент очередного переноса капли. Таким образом, капельный перенос снижает эластичность дуги.

Г.Н. Тиходеев [7] предложил измерять напряжение дуги раздельно в полупериоды прямой и обратной полярности. При этом напряжение зажигания суммируется с напряжением на дуге. Этот метод позволяет в какой-то мере получить оценку стабильности дуги и не требует применения сложной аппаратуры. После погасания дуги при очередном переходе тока через нуль остаточная плазма быстро остывает и ее проводимость быстро падает. Длительность существования остаточной плазмы и величина ее проводимости в значительной мере определяют характер и параметры повторного зажигания дуги и, по мнению И.К. Походни [15], могут служить достаточно объективным критерием оценки ее стабильности.

И.В. Кирдо измерял проводимость остаточной плазмы в зависимости от условий сварки и состава электродного покрытия методом зондирования межэлектродного промежутка [12]. При исследовании процесса сварки толсто покрытыми электродами возникают серьезные методические трудности из-за малой длины дуги и наличия глубокой втулки из покрытия.

По данным Л.Г. Шафранского и А.В. Абрашина [16], более удобно зондировать межэлектродный промежуток напряжением холостого хода источника питания. Однако высокое напряжение может способствовать разогреву остаточной плазмы и тем самым исказить результаты экспериментов.

Г.И. Лесковым предложено оценивать стабильность дуги по скорости нарастания тока при повторном ее зажигании в каждом полупериоде [8]. Скорость нарастания тока регистрируется на экране осциллографа в виде фазовых траекторий. Производная dI/dt не меняет знак, но в момент перехода через нуль ее значение существенно уменьшается. Расстояние характеризует значение производной и может служить объективным критерием оценки стабилизирующих свойств покрытия. Использование нелинейных шунтов позволяет значительно увеличить точность измерения тока в области малых значений. Однако В.Ю. Арлазаускас и И.Р. Нарушкевичус [17] показали, что этим методом невозможно сравнить стабильность дуги при сварке на различных сварочных токах, так как скорость изменения тока (dI/dt) при переходе его через нуль определяется его амплитудным значением (при постоянной частоте), т.е. чем меньше ток, тем ниже значение dI/dt . Это значит, что при малых токах горение дуги невозможно, что не подтверждается экспериментами. В связи с этим авторы предложили оценивать стабильность повторного зажигания (по фазовым траекториям) по отношению минимальной скорости изменения сварочного тока в процессе повторного зажигания дуги к максимальной скорости изменения тока перед погасанием дуги. Авторы данной работы считают, что использование подобного коэффициента удобно, так как отпадает необходимость в градуировке приборов и измерении абсолютных величин производных, но для достоверного определения величины коэффициента требуется длительное наблюдение за фазовыми траекториями (сварка тремя-пятью электродами). К сожалению, в данной работе отсутствуют конкретные примеры использования этой методики, поэтому трудно оценить ее достоверность и удобство.

По мнению В.А. Троицкого, скорость перехода тока через нуль определяется только характеристикой источника питания, и, следовательно, влияние свойств сварочных материалов на dI/dt должно быть незначительно.

И.И. Заруба и В.В. Дыменко [6] попытались объединить в одном показателе параметры переноса металла, повторного зажигания дуги, свойств плазмообразующего газа и сварочных трансформаторов. Они указывают, что использовать этот показатель можно тогда, когда перенос металла осуществляется без коротких замыканий. Этот метод не может получить широкого применения из-за большой трудоемкости. К тому же он неприемлем для ручной дуговой сварки покрытыми электродами, так как в этом случае перенос металла осуществляется преимущественно с коротким замыканием.

В методике А. Бессона [15] стабилизирующие свойства сварочных электродов оцениваются по степени искажения кривой сварочного тока, определяемой как отношение тангенсов углов β и α . Чем ближе указанное соотношение к единице, тем выше стабильность дуги. Степень искажения кривой тока зависит как от электрических свойств дуги, так и от конструктивных особенностей трансформатора, и критерий А. Бессона учитывает это. Согласно анализу, выполненному Т.С. Саладженом и С. Боарном [15], этот критерий может включать в себя характеристики конструкции трансформатора. Исследования по определению данного критерия, проведенные в этой работе, показали, что критерий достаточно верно отражает влияние характеристик сварочных материалов и трансформатора. Однако точное определение положения касательных по осциллограммам тока затруднено. В связи с этим возникает большая погрешность метода, что является серьезным недостатком методики А. Бессона. Пути повышения точности оценки (одновременно усложняющие ее) предложены в работе.

Л. Дорн и П. Риппл предлагают оценивать стабильность горения дуги постоянного и переменного тока по площади «рабочего поля» характеристики $U_d = f(I_{св})$, получаемой на катодном осциллографе (дисплее, графопостроителе) путем наложения множества кривых $U_d = f(I_{св})$ одной на другую за определенное время сварки, в результате чего образуется засвеченное «рабочее поле». Чем меньше площадь этого поля, тем стабильнее дуга. Замечено, что «рабочее поле» по напряжению дуги у электродов с основным типом покрытия меньше, чем с рутиловым, несмотря на худшие стабилизирующие свойства первых.

Приближенным к требованиям практики является метод, основанный на определении минимального напряжения холостого хода сварочного трансформатора $U_{х.х}^{\min}$, при котором дуга горит еще без об-

рывов [1]. При этом предполагается использование трансформатора с регулируемым $U_{x.x}$. Одним из недостатков метода является необходимость регистрации обрыва дуги, который заметен, когда дуга либо погасла окончательно, либо погасла и вновь самостоятельно возбудилась через промежуток времени, превышающий 0,2–0,5 с. Число таких полупериодов, когда дуга не зажигается, но окончательного обрыва дуги не происходит, может достигать 20 % от общего числа полупериодов. Такой процесс горения дуги стабильным назвать нельзя.

На основании всего вышеизложенного можно сделать вывод, что стабильность горения дуги переменного тока определяют процессы, протекающие в переходный период. Дуга устойчива, если потери тепла в окружающее пространство компенсируются подводимой электрической мощностью. Исходя из условия динамической устойчивости дугового промежутка в области нулевых значений тока, описанных в работе [8], следует, что стабильность лучше всего характеризовать показателями, отражающими сопротивление (проводимость) межэлектродного промежутка.

Необходимо отметить, что большинство рассмотренных выше методик оценивают стабильность процесса горения дуги переменного тока.

При сварке покрытыми электродами на постоянном токе нарушения процесса горения дуги связаны, чаще всего, с переносом капель электродного металла, особенно если процесс сопровождается короткими замыканиями дугового промежутка. Шунтирование дуги каплями приводит к ее погасанию, однако полной деионизации межэлектродного промежутка не происходит. В конце короткого замыкания образуется тонкая перемычка сильно перегретого металла с частичным его испарением. В такой парогазовой фазе дуга легко возбуждается вновь. Перенос электродного металла можно оценивать по длительности коротких замыканий. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют об информативности этого показателя.

В последнее время участилось применение для оценки стабильности дуги постоянного тока информационно-измерительных систем, включающих в себя ЭВМ, что позволило использовать для этого методы математической статистики и выделить несколько критериев. Так, авторы ряда работ предлагают оценивать стабильность дуги постоянного тока по дисперсии мгновенных значений напряжения дуги U_d при

многократном его измерении. Чем меньше значение дисперсии, тем стабильнее горит дуга. У электродов с рутиловым покрытием (с высокими стабилизирующими свойствами) значения дисперсии больше, чем у электродов с основным покрытием и низкими стабилизирующими свойствами. Это обусловлено различием в характере переноса металла. Чем меньше размер капель электродного металла, тем выше частота их переноса и тем чаще напряжение дуги отклоняется от среднего значения. При крупнокапельном переносе металла (характерном для электродов с основным видом покрытия) эти колебания напряжения дуги значительно реже и, соответственно, меньше дисперсия. Таким образом, наличие обратной пропорциональной связи между стабильностью дуги и значением дисперсии подтверждается не всегда.

На стабильность горения сварочной дуги оказывают влияние множество факторов:

- компоненты, входящие в покрытие;
- характеристики источника питания;
- колебания напряжения сети;
- качество и состояние электродов (влажность электродов, эксцентричность покрытия и пр.);
- качество подготовки металла под сварку (наличие оксидов металла, масляных пленок и др.);
- навыки сварщика (если ручной способ сварки) и другие возмущающие факторы, влияющие на устойчивость дугового процесса.

Поэтому при оценке стабильности горения дуги необходимо учитывать максимальное количество влияющих факторов или наиболее важные из них.

Состав покрытия, род и полярность тока оказывают большое влияние также на характер плавления и переноса электродного металла, которые, в свою очередь, определяют технологические особенности процесса сварки: форму шва, разбрызгивание, возможность сварки в различных пространственных положениях и др.

Для количественной оценки стабильности дуги постоянного тока можно использовать значения длительности коротких замыканий (при их наличии), напряжения горения дуги, тока сварки, тока короткого замыкания и др. с использованием анализа распределения U_d и $I_{св}$ и методов поэтапной обработки гистограмм. Для более точной оценки стабилизирующих свойств покрытия широко используется осциллогра-

фирование изменения сварочного тока и напряжения. Так, например, по количеству коротких замыканий при сварке оценивается стабильность горения сварочной дуги.

Разработанная на кафедре сварочного производства и технологии конструкционных материалов ПНИПУ методика оперативной оценки стабильности горения дуги по динамическим характеристикам сварочного тока и напряжения была применена для исследования влияния состава покрытия электродов на стабильность горения дуги. Приняв за параметр оптимизации отфильтрованный коэффициент вариации сварочного тока, коэффициенты уравнения регрессии находили методом наименьших квадратов с применением алгебры матриц.

При анализе экспериментальных данных были рассмотрены неотфильтрованные (рис. 1) и отфильтрованные (рис. 2) значения сварочного тока и напряжения.

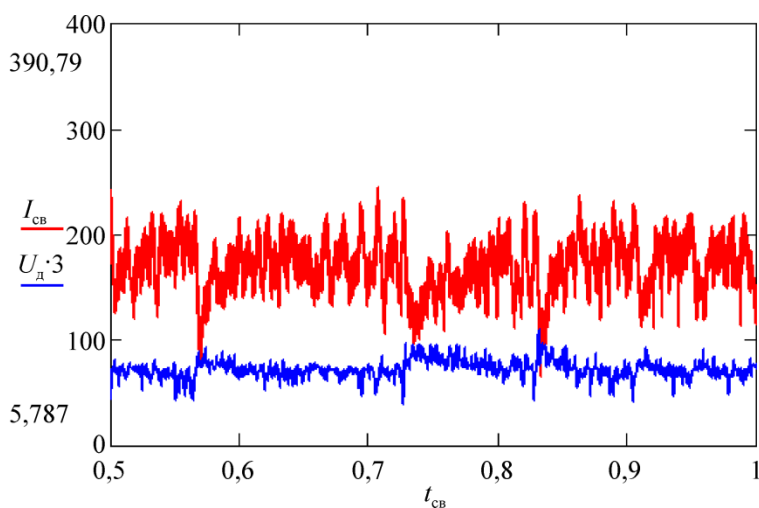


Рис. 1. Оциллограммы неотфильтрованных сварочного тока $I_{св}$ (верхняя кривая) и напряжения $U_{д \cdot 3}$ (нижняя кривая) при сварке электродами 1800

Очень высокая корреляция наблюдается между расчетными значениями коэффициентов вариации по отфильтрованному току и напряжению. Коэффициент корреляции составляет 0,917. Это хорошо иллюстрирует рис. 3.

Оциллограммы тока напряжения хорошо иллюстрируют стабильность процесса сварки. Так, у оциллограмм с высокими коэффициентами вариации значительно больший разброс тока и напряжения.

Также интерес представляет и характер распределения сварочного тока и напряжения при сварке. На рис. 4 приведены гистограммы распределения сварочного тока и напряжения при сварке электродами 1800 (с самыми низкими коэффициентами вариации).

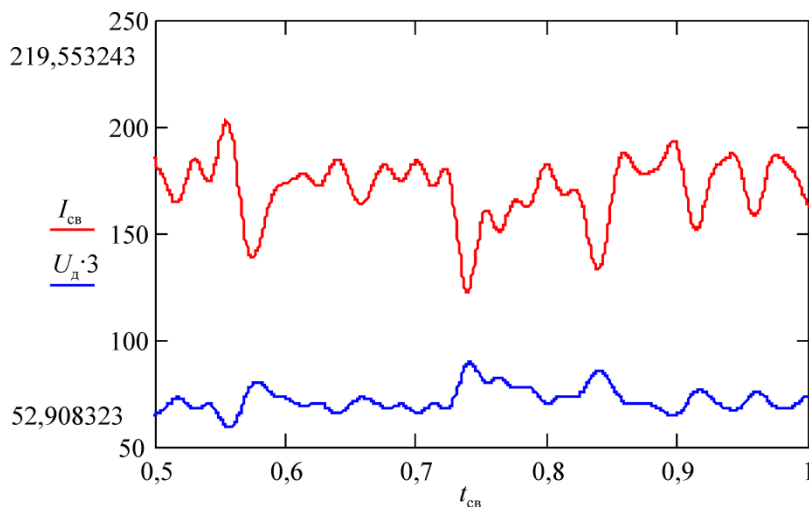


Рис. 2. Оциллограммы отфильтрованных сварочного тока $I_{св}$ (верхняя кривая) и напряжения $U_{д} \cdot 3$ (нижняя кривая) при сварке электродами 1800

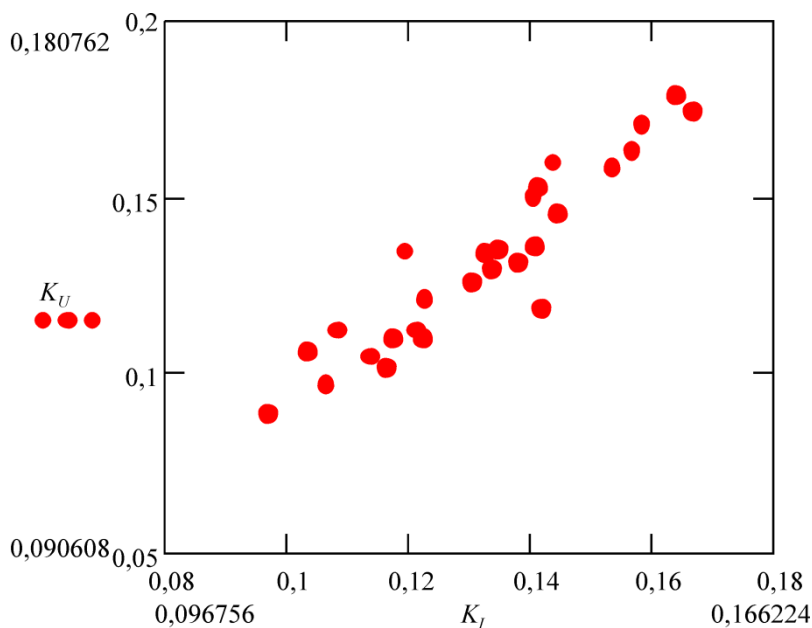


Рис. 3. Корреляционное поле между значениями коэффициентов вариации по отфильтрованному току и напряжению

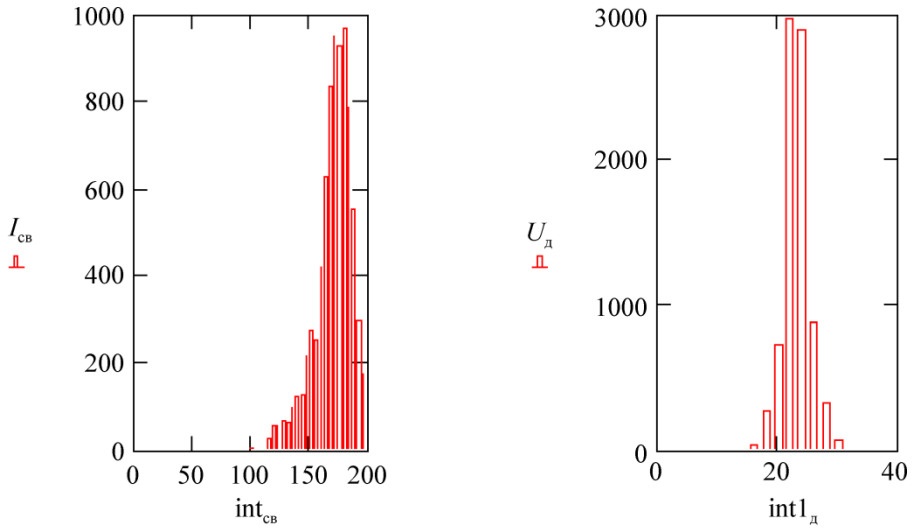


Рис. 4. Гистограммы распределения отфильтрованных сварочного тока $I_{св}$ и напряжения $U_{д}$ для электрода 1800

Наглядно характеризует процесс горения дуги и «рабочее поле» зависимость между напряжением и током (рис. 5).

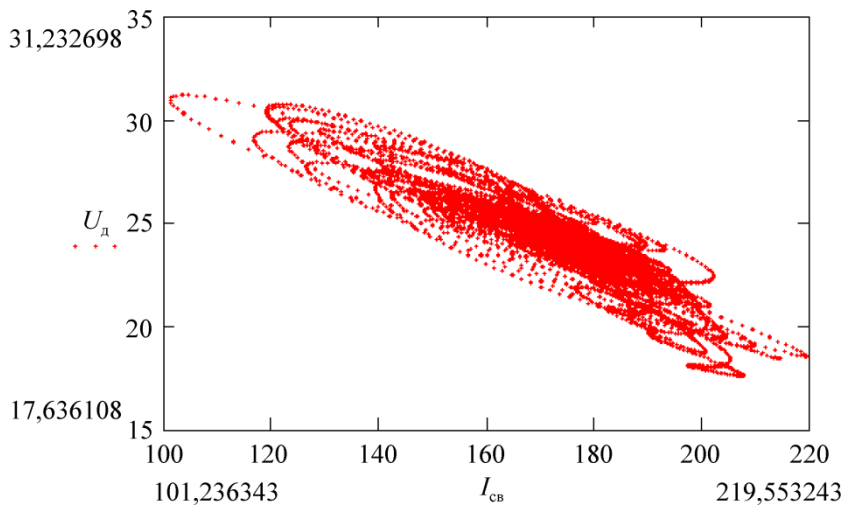


Рис. 5. «Рабочее поле» при сварке электродами 1800 (ток и напряжение отфильтрованы)

По результатам регрессионного анализа установлено, что наиболее информативным показателем оценки стабильности горения сварочной дуги является коэффициент вариации для значений фильтрованного то-

ка, который может быть выбран для дальнейшей оптимизации состава покрытия электродов. Для получения числовых данных динамических характеристик сварочного тока может быть применена методика оценки стабильности горения сварочной дуги, усовершенствованная на кафедре сварочного производства и ТКМ ПНИПУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства образования и науки РФ (грант № 11.1196.2014/К).

Список литературы

1. Патон Б.Е. Исследование условий устойчивого горения сварочной дуги и ее регулирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 1951. – 30 с.
2. Походня И.К., Заруба И.И., Пономарев В.Е. Критерии оценки стабильности процесса дуговой сварки на постоянном токе // Автоматическая сварка. – 1989. – № 8. – С. 1–4.
3. Букаров В.А., Ермаков С.С., Дорина Т.А. Оценка стабильности дуговой сварки по осциллограммам процесса с использованием статистических методов // Сварочное производство. – 1990. – № 12. – С. 30–32.
4. Рабинович И.Я. Оборудование для дуговой электрической сварки: Источники питания. – М.: Машгиз, 1958. – 380 с.
5. Лебедев В.К., Сидоренко М.Н. О динамических свойствах источников питания постоянного тока для ручной дуговой сварки // Новые проблемы сварочной техники. – Киев, 1964. – С. 216–224.
6. Заруба И.И., Дыменко В.В. Влияние капельного переноса металла на устойчивость сварочной дуги переменного тока // Автомат. сварка. – 1983. – № 12. – С. 14–20.
7. Тиходеев Г.Н. Энергетические свойства электрической сварочной дуги. – Л.: Изд-во АН СССР, 1961. – 254 с.
8. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 336 с.
9. Кирдо И.В. О физических процессах при повторном зажигании дуги переменного тока // Автомат. сварка. – 1956. – № 3. – С. 1–16.
10. Хренов К.К. Технология дуговой электросварки. – М.; Киев: Машгиз, 1949. – 204 с.
11. Мак-Даниель И. Процессы столкновений в ионизированных газах. – М.: Мир, 1967. – 832 с.

12. Кирдо И.В. О механизме повторного зажигания сварочной дуги переменного тока // Автомат. сварка. – 1956. – № 6. – С. 38–54.

13. Кузьмак Е.М. Вопросы шихтования электродных покрытий // Автоген. дело. – 1978. – № 12. – С. 6–9.

14. Лугин В.П. Сравнительная характеристика стабильности горения дуги при сварке штучными электродами переменным током // Свароч. производство. – 1975. – № 1. – С. 39–40.

15. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов / И.К. Походня, В.Н. Корнелюк, С.С. Миличенко [и др.]; под ред. И.К. Походни; АН УССР; Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. – Киев: Наук. думка, 1990. – 224 с.

16. Шафранский Л.Г., Абрашин А.В. Деионизирующее влияние плавленого шпата при сварке электродами с покрытиями фтористо-кальциевого типа // Свароч. производство. – 1974. – № 12. – С. 12.

17. Арлазаускас В.Ю., Нарушкевичус И.Р. Количественная оценка стабильности повторного возбуждения сварочной дуги // Автомат. сварка. – 1974. – № 8. – С. 9–10.

References

1. Paton V.E. Issledovanie uslovii ustoichivogo goreniia svarochnoi dugi i ee regulirovaniia [Investigation of the conditions of combustion stability of the arc and its re-regulation]. Doctor's degree dissertation. Kiev, 1951. 30 p.

2. Pokhodnia I.K., Zaruba I.I., Ponomarev V.E. Kriterii otsenki stabil'nosti protsessa dugovoi svarki na postoiannom toke [Criteria for assessing the stability of the arc welding process in the constant-current rated]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1989, no. 8, pp. 1-4.

3. Bukarov V.A., Ermakov S.S, Dorina T.A. Otsenka stabil'nosti dugovoi svarki po ostsillogrammam protsessa s ispol'zovaniem statisticheskikh metodov [Assessment of the stability of arc welding process oscillograms using statistical methods]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1990, no. 12, pp. 30-32.

4. Rabinovich I.Ia. Oborudovanie dlia dugovoi elektricheskoi svarki: Istochniki pitaniia [Equipment for electric arc welding: Power Sources]. Moscow: Mashgiz, 1958. 380 p.

5. Lebedev V.K., Sidorenko M.N. O dinamicheskikh svoistvakh istochnikov pitaniia postoiannogo toka dlia ruchnoi dugovoi svarki [On the

dynamic properties of DC power supplies for manual arc welding]. *Novye problemy svarochnoi tekhniki*. Kiev, 1964, pp. 216-224.

6. Zaruba I.I., Dymenko V.V. Vliianie kapel'nogo perenosa metalla na ustoichivost' svarochnoi dugi peremennogo toka [The impact of a drop metal transfer on the stability of the welding rods do an alternating current]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1983, no. 12, pp. 14-20.

7. Tikhodeev G.N. Energeticheskie svoistva elektricheskoi svarochnoi dugi [Energy properties of electric arc]. Leningrad: Akademiia nauk SSSR, 1961. 254 p.

8. Leskov G.I. Elektricheskaiia svarochnaia duga [Electric arc]. Moscow: Mashinostroenie, 1970. 336 p.

9. Kirdo I.V. O fizicheskikh protsessakh pri povtornom zazhiganii dugi peremennogo toka [On physical processes in the re-ignition of the arc an alternating current]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1956, no. 3, pp. 1-16.

10. Khrenov K.K. Tekhnologiia dugovoi elektrosvarki [Arc welding technology]. Moscow, Kiev: Mashgiz, 1949. 204 p.

11. Mak-Daniel' I. Protsessy stolknovenii v ionizirovannykh gazakh [The processes of collisions in ionized gases]. Moscow: Mir, 1967. 832 p.

12. Kirdo I.V. O mekhanizme povtornogo zazhiganiia svarochnoi dugi peremennogo toka [On the mechanism of re-ignition of the arc an alternating current]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1956, no. 6, pp. 38-54.

13. Kuz'mak E.M. Voprosy shikhtovaniia elektrodnykh pokrytii [Questions burdening electrode coatings]. *Avtogennoe delo*, 1978, no. 12, pp. 6-9.

14. Lugin V.P. Sravnitel'naia kharakteristika stabil'nosti gorenii dugi pri svarke shtuchnymi elektrodami peremennym tokom [Comparative characteristics of the stability of the arc when MMA welding alternating current]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1975, no. 1, pp. 39-40.

15. Pokhodnia I.K., Korneliuk V.N., Milichenko S.S. Metallurgiiia dugovoi svarki: Protsessy v duge i plavlenie elektrodov [Metal arc welding processes in the arc and melting electrodes]. Ed. by I.K. Pokhodnia. Kiev: Naukova dumka, 1990. 224 p.

16. Shafranskii L.G., Abrashin A.V. Deioniziruiushchee vliianie plavikovogo shpata pri svarke elektrodami s pokrytiiami fluoristokal'tsievogo tipa [Deionized impact of fluorspar in welding electrodes coated with rutile-type calcium]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1974, no. 12, p. 12.

17. Arlauskas V.Iu., Narushkevichus I.R. Kolichestvennaia otsenka stabil'nosti povtornogo vzbuzhdeniia svarochnoi dugi [Quantitative assessment of the stability of re-excitation of the welding arc]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1974, no. 8, pp. 9-10.

Получено 29.06.2015

Об авторе

Летягин Игорь Юрьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: letyagin@pstu.ru.

About the author

Igor Iu. Letiagin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Welding Production and Technology of Structural Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: letyagin@pstu.ru.