

Влияние импульсного тока на каплеперенос при двухэлектродной наплавке в газах

Елсуков Сергей Константинович*¹, кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства»
Зорин Илья Васильевич², доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства»
Несин Дмитрий Сергеевич, аспирант

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград (Россия)

*E-mail: serzh.elsukov@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4965-8028>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9912-2598>

Поступила в редакцию 14.04.2025

Пересмотрена 30.05.2025

Принята к публикации 09.06.2025

Аннотация: Применение для наплавки двумя электродными проволоками схемы с общим источником импульсного тока повышает энергоэффективность дугового процесса и технологические свойства сварочной дуги, но требует более детального изучения влияния параметров режима на ее стабильность. В связи с этим в данной работе основное внимание уделено изучению динамики формирования и переноса металлических капель при различных режимах импульсного питания сварочной дуги. С использованием скоростной видеосъемки сварочной дуги и синхронизированной записи сигналов тока и напряжения установлен режим (среднее значение тока 250 А, максимальное в импульсе 600 А, напряжение на дуге ~30 В), который обеспечивает стабильный процесс переноса электродного металла общей для двух проволок капель без образования коротких замыканий. Обнаружено, что общая капля под действием электродинамических сил приобретает центростремительное ускорение, что способствует ее направленному переносу в сварочную ванну и позволяет максимально снизить количество брызг на поверхности основного металла. С использованием математического моделирования был подтвержден характер взаимодействия сварочных дуг на двух проволоках и установлено, что даже на стадии «горячей» фазы импульса тока (600 А, $t=0,8$ с) давление дуги на поверхность пластины меньше, чем при сварке одной проволокой на постоянном токе. Выявленный эффект связан с изменением направления плазменного потока на перпендикулярное к оси проволоки вследствие увеличения электродинамической силы притяжения магнитных полей вокруг двух проволочных проводников. В совокупности со снижением температуры дуги и давления на поверхность пластины в фазе «контроля тепловложения» импульса тока (180 А, $t=1,4$ с) это должно способствовать уменьшению тепловложения и глубины проплавления основного металла, а следовательно, уменьшить степень разбавления наплавляемого сплава металлом подложки. Последнее особенно востребовано при решении задач по созданию технологии наплавки относительно тонких слоев из коррозионностойких сплавов, в частности, на поверхности изделий нефтехимического оборудования.

Ключевые слова: двухэлектродная наплавка; импульсно-дуговой процесс; сварочная дуга; каплеперенос; численное моделирование.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-20068 (<https://rscf.ru/project/24-23-20068/>) и гранта Администрации Волгоградской области по соглашению № 7 от 31.05.2024.

Для цитирования: Елсуков С.К., Зорин И.В., Несин Д.С. Влияние импульсного тока на каплеперенос при двухэлектродной наплавке в газах // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 2. С. 9–18. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-1.

ВВЕДЕНИЕ

Качество и эксплуатационная надежность изделий металлургической и машиностроительной отрасли во многом определяются уровнем развития технологических процессов сварки и наплавки. Как следствие, приоритетной задачей является постоянное совершенствование сварочных технологий, направленное на разработку способов, позволяющих повысить производительность этих процессов и улучшить свойства сварных соединений и наплавленного металла. Одним из таких способов является двухэлектродная сварка и наплавка, в которой проволочные электроды подключены к общему источнику питания [1; 2]. Она широко применяется как для сварки толстостенных конструкций, так и для

формирования слоя высокооловянной бронзы на стали [3] и коррозионностойких наплавленных покрытий [4], что расширяет технологические возможности сварочного производства.

С использованием методов математического моделирования было выявлено, что температура плазмы двухэлектродной дуги в целом ниже по сравнению с одноэлектродным процессом, ниже и ее максимальная температура и давление дуги на поверхность сварочной ванны [5]. При этом средняя температура электродного металла ниже [6]. При двухэлектродной наплавке уменьшается тепловой поток в изделие [7], что способствует снижению деформации наплавляемого изделия. Подобного результата позволяет достичь и наложение

на дугу импульсов тока с применением специальных алгоритмов управления ими [8–10], что в настоящее время массово реализовано в серийно выпускаемых полуавтоматах и фактически стало базовым решением для одноэлектродной механизированной сварки и наплавки в защитных газах. Существующее оборудование для использования импульсного тока с двумя электродными проволоками промышленно освоено для процесса двухдуговой сварки «танDEMом», когда каждая проволока подключается к обособленному источнику питания [11–13].

Применение для двух электродных проволок схемы с общим электропитанием [14] повышает не только энергоэффективность дугового процесса, но и его технологичность, поскольку для его реализации не требуется комплектовать каждую электродную проволоку механизмом подачи и дополнительной оснасткой. Имеющийся положительный опыт применения двухэлектродной наплавки для формирования плакирующих коррозионностойких покрытий основан на использовании относительно небольших значений напряжения на дуге, что обеспечивает перенос электродного металла в режиме формирования так называемой «общей» для двух плавящихся электродных проволок капли и минимизирует долю участия основного металла в наплавленном до 30 % [15].

Представляет интерес использование для наплавки двумя электродными проволоками общего источника импульсного тока, что даст возможность развить преимущества двухэлектродной схемы по повышению технологических свойств дуги (качества переноса электродного металла в дуге, тепловложения в основной металл и др.). По этой причине необходимо исследовать влияние на дугу не только основных параметров режима, но и импульсного тока.

Актуальность данной темы обусловлена также необходимостью повышения качества процессов сварки и наплавки при освоении новой продукции на предприятиях нефтехимического машиностроения и решения стоящих перед ними задач по технологическому опережению. Это позволит улучшить качество наплавленных покрытий, снизить затраты и увеличить эффективность производственных процессов.

Цель работы – определить оптимальный режим импульсного питания сварочной дуги при двухэлектродной наплавке, обеспечивающий формирование общей капли и ее направленный перенос в сварочную ванну без замыканий дугового промежутка.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модернизация сварочного оборудования

Для проведения экспериментальных исследований сварочный импульсный полуавтомат Lorch S8 Pulse XT (Германия) был дооснащен парой роликов (изготовлены FDM-печатью) с двумя одинаковыми канавками V-образной формы для использования в подающем механизме одновременно двух проволок диаметром 1,6 мм, которые через фторопластовую гибкую трубку подавали во внешний токоподводящий узел, снабженный водоохлаждаемым соплом. В настройках полуавтомата выбирали программу «Импульс».

Экспериментальная установка и измерения

Схема исследования дугового процесса наплавки (рис. 1) включала систему высокоскоростной фотосъемки iSpeedy 50MT13M-SE (Китай) и многоканальный аналого-цифровой преобразователь LA-20USB (Россия) для контроля изменений напряжения и тока во времени с частотой дискретизации 5 кГц. Обработку полученных осциллограмм производили в специализированном программном обеспечении PowerGraph 3.3 Pro.

Система высокоскоростной фотосъемки включала в себя камеру, соединенную с ноутбуком через интерфейс Ethernet 10 Гбит/с, и специальное программное обеспечение iSpeedyPro, в котором осуществляли настройку параметров режима работы камеры и первичную обработку полученного видеосигнала. Камера имеет расширенную скоростную память объемом 64 Гб. Для защиты камеры и передней линзы объектива от попадания сварочных брызг использовали специальный корпус. Видеосъемку зоны сварочной дуги производили на скорости 5000 кадров/с. Направление съемки было перпендикулярно соединительной линии между двумя сварочными проволоками. Высокоскоростные кадры дуги были синхронизированы с записью электрических сигналов, что позволило сопоставить динамику образования и переноса капли в дуге с изменением в ней тока и напряжения.

Параметры наплавки

Наплавку производили на пластины марки СтЗсп размером 200×100×10 мм, перемещаемые со скоростью наплавки 13 м/ч специальным механизмом относительно неподвижной сварочной головки. Наплавку в импульсном режиме производили при силе тока $I=280$ А и напряжении $U_d=24$ В с межосевым расстоянием $b=6$ мм. Использовали сварочную проволоку диаметром 1,6 мм марки AG ER-347Si (Св-08X19H10Г2Б) и смесь аргона и двуокиси углерода (97,5 % + 2,5 %). Расход газовой смеси составлял 25–30 л/мин.

Математическое моделирование дуги

Для более наглядной и комплексной оценки электро- и теплофизических процессов, происходящих в сварочной дуге под влиянием импульсного тока, выполняли математическое моделирование в программном комплексе Comsol Multiphysics. Примененный в работе подход к созданию модели сварочной дуги основан на системе взаимосвязанных уравнений, описывающих сложное взаимодействие гидродинамических, электромагнитных и тепловых процессов в плазменном разряде, а также на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии, дополненных уравнениями электродинамики для проводящей среды¹. Гидродинамическая часть модели рассматривает плазму как вязкую электропроводящую жидкость, движение которой определяется балансом сил давления, вязкости и электромагнитного воздействия. Электромагнитные процессы описываются с учетом генерации магнитного поля

¹ Елсуков С.К. *Повышение эффективности двухэлектродной наплавки в защитных газах хромоникелевых аустенитных сталей на детали нефтехимического оборудования*: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2023. 143 с. EDN: [MEZKRU](#).

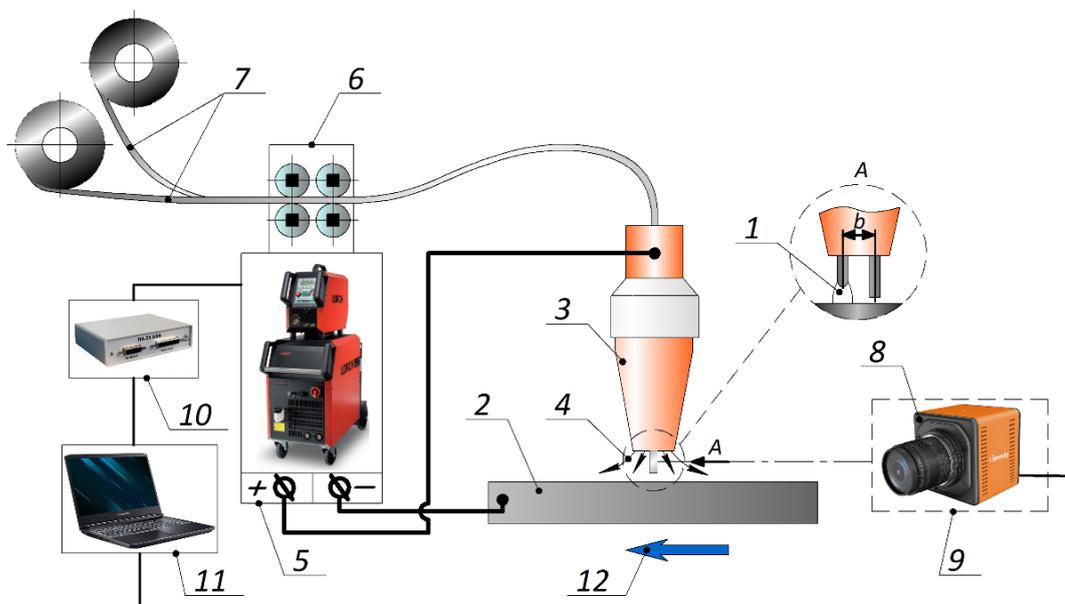


Рис. 1. Схема исследования реакционной зоны сварочной дуги в процессе двухэлектродной импульсной наплавки:

1 – сварочная дуга; 2 – наплавляемая пластина; 3 – сопло подачи защитного газа;
4 – поток защитного газа; 5 – сварочный полуавтомат; 6 – подающий механизм; 7 – сварочные проволоки;
8 – высокоскоростная камера; 9 – защитный корпус камеры; 10 – аналого-цифровой преобразователь;
11 – компьютер; 12 – направление перемещения пластины

Fig. 1. Scheme of the study of the welding arc reaction zone in the process of double-electrode pulsed surfacing:

1 – welding arc; 2 – deposited plate; 3 – shielding gas supply nozzle;
4 – shielding gas flow; 5 – semiautomatic welding machine; 6 – feed mechanism; 7 – welding wires;
8 – high-speed camera; 9 – protective camera housing; 10 – analog-to-digital converter;
11 – computer; 12 – plate movement direction

током дуги и его обратного влияния на распределение заряженных частиц. Тепловые эффекты включают Джоулев нагрев, конвективный и кондуктивный перенос тепла, а также радиационные потери энергии. Длину дуги задавали в модели согласно кадрам скоростной видеосъемки ($l_d=6$ мм).

Модель построена на ряде обоснованных допущений, включая предположение о локальном термодинамическом равновесии плазмы, ламинарном характере течения и пренебрежение процессами фазовых переходов в электродных материалах. Взаимосвязь уравнений обеспечивали через определяющие соотношения для теплофизических и электродинамических свойств плазмы, что позволило получить замкнутую систему для численного решения. Такой подход позволил исследовать влияние различных параметров сварочной дуги на распределение температур, давление и скорости потоков в ее плазменном столбе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ осциллограммы модулированного тока, полученной при скорости подачи сварочной проволоки 2 м/мин, показывает, что среднее значение сварочного тока составило 280 А при частоте модуляции ~333 Гц (рис. 2).

На торцах сварочных проволок одновременно формируются крупные капли (рис. 3, кадр *a*), которые удерживаются силами поверхностного натяжения и притягиваются под действием электродинамической силы (рис. 3, кадры *b*, *c*). В момент кадра *d* капли на торцах проволок объединяются, одна из капель перете-

кает к другой. Образовавшаяся общая капля электродного металла замыкается на поверхность сварочной ванны и переходит в нее (рис. 3, кадр *e*).

Дальнейшее увеличение силы тока до 280 А нарушает стабильность процесса каплепереноса и формирования общей капли, которая оттесняется в сторону токоподводящего наконечника (рис. 4).

При использовании импульсного режима сварки при скорости подачи проволоки 2 м/мин и напряжении на дуге 24 В среднее значение силы тока достигало 280 А. В данном режиме источник тока Lorch S8 Pulse XT генерирует импульсный сигнал сложной формы (рис. 5). В начале каждого импульса сила тока резко возрастает до 620 А и удерживается на этом уровне в течение 3 мс. Затем, плавно снижаясь в течение 5 мс, она достигает 200 А, после чего с такой же скоростью уменьшается до базового значения 60 А. Частота повторения импульсов составляет 105 Гц, обеспечивая стабильность процесса сварки.

В ходе анализа полученных кадров зоны дуги при ее импульсном питании было выявлено, что в момент прохождения импульса тока отрыва сварочных капель от электрода не происходит (рис. 6, кадр *b*), в отличие от одноэлектродного процесса. Вместо этого энергия импульса расходуется на формирование крупных капель, которые по мере роста объединяются в общую каплю. Переход общей капли происходит через короткое замыкание (рис. 6, кадр *d*), что схоже с характером каплепереноса при использовании постоянного тока.

Полученные результаты не позволяют полностью раскрыть возможности импульсного питания сварочной

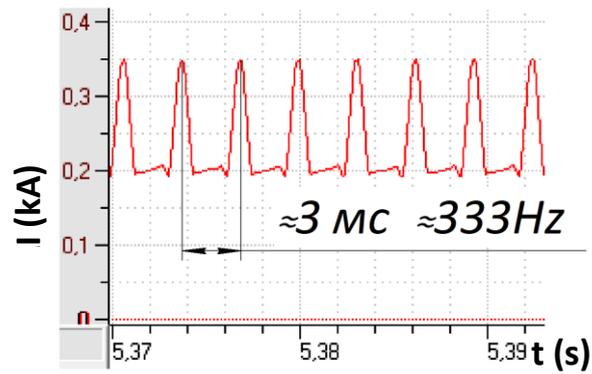


Рис. 2. Внешний вид осциллограммы модулированного тока источника питания Lorch S8 Pulse XT
Fig. 2. External appearance of the oscillogram of the modulated current of the Lorch S8 Pulse XT power supply

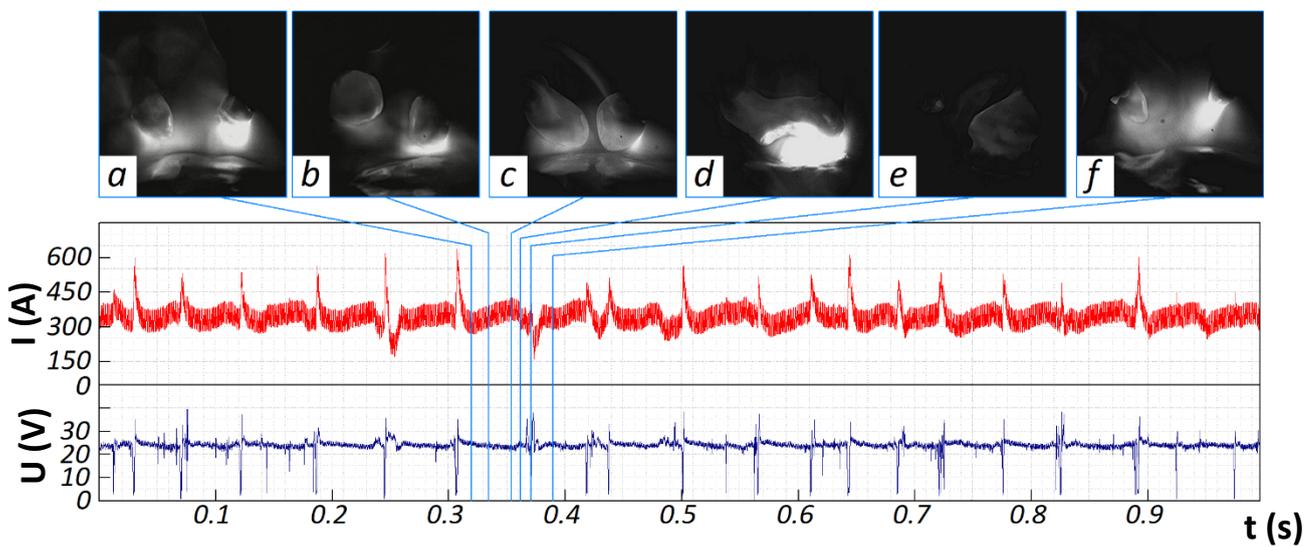


Рис. 3. Внешний вид осциллограммы постоянного тока и напряжения, а также кадры высокоскоростной видеосъемки ($I=280\text{ A}$; $U_0=23\text{ B}$)
Fig. 3. External appearance of the oscillogram of the direct current and voltage and high-speed video footage ($I=280\text{ A}$; $U_{arc}=23\text{ V}$)

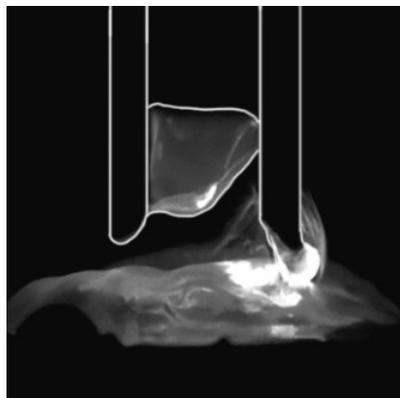


Рис. 4. Оттеснение общей капли в верхнюю часть реакционной зоны дуги
Fig. 4. Displacement of the common drop to the upper part of the arc reaction zone

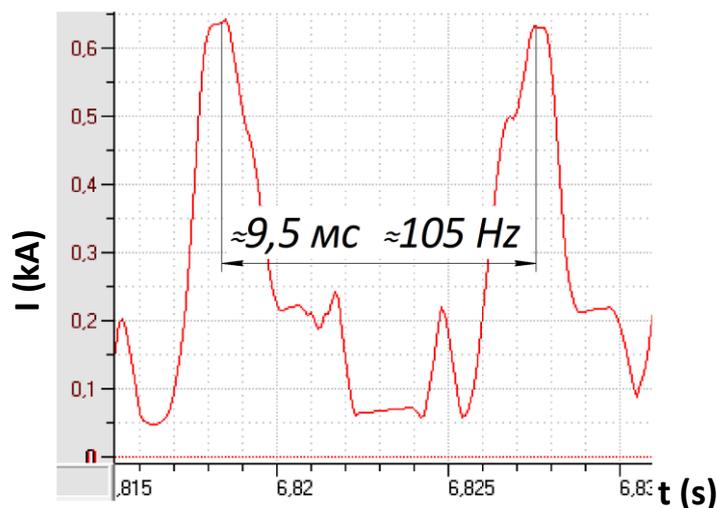


Рис. 5. Внешний вид осциллограммы импульсного тока источника питания Lorch S8 Pulse XT
 Fig. 5. External appearance of the oscillogram of the pulse current of the Lorch S8 Pulse XT power supply

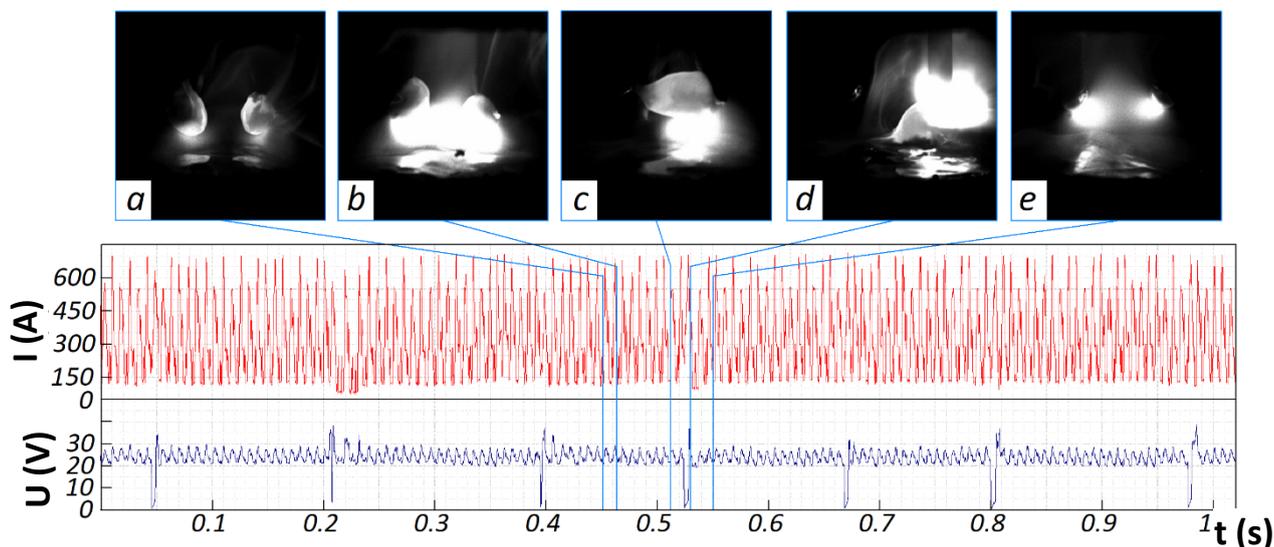


Рис. 6. Внешний вид осциллограммы импульсного тока и напряжения, а также кадры высокоскоростной видеосъемки ($I=280\text{ A}$; $U_{\delta}=24\text{ B}$)
 Fig. 6. External appearance of the oscillogram of the pulse current and voltage and high-speed video footage ($I=280\text{ A}$; $U_{arc}=24\text{ V}$)

дуги из-за сохранения режима переноса каплей через их замыкания на поверхность сварочной ванны. Для предотвращения этого можно увеличить длину дуги, установив повышенное значение напряжения (например, до 30 В) на сварочном полуавтомате. В этом случае процесс каплепереноса начинается с попеременного существования дуги на торцах сварочных проволок (рис. 7, кадры *a, b*). Частота перемещения дуги составляет в среднем 150 Гц, что соответствует импульсам тока, генерируемым источником питания. С ростом каплей (рис. 7, кадры *c, d*), примерно через 100 мс, дуга переходит в режим одновременного расплавления проволок, и по мере увеличения объема каплей они через 50 мс объединяются в общую каплю. После этого крупная

общая капля перетекает на торец одной из проволок и переходит в сварочную ванну. Длительность общего цикла формирования и переноса капли составляет примерно 300 мс. Переход капли в сварочную ванну отличается от перехода при сварке на постоянном токе: в момент отрыва мощный импульс тока сообщает капле дополнительное центростремительное ускорение (рис. 7, кадр *e*). Для данного режима характерно отсутствие коротких замыканий общей капли, что позволяет максимально снизить количество брызг на поверхности основного металла. Поэтому этот режим наплавки является наиболее перспективным. Дальнейшее повышение силы тока до 350 А в источнике сварочного тока, согласно полученной осциллограмме, происходит

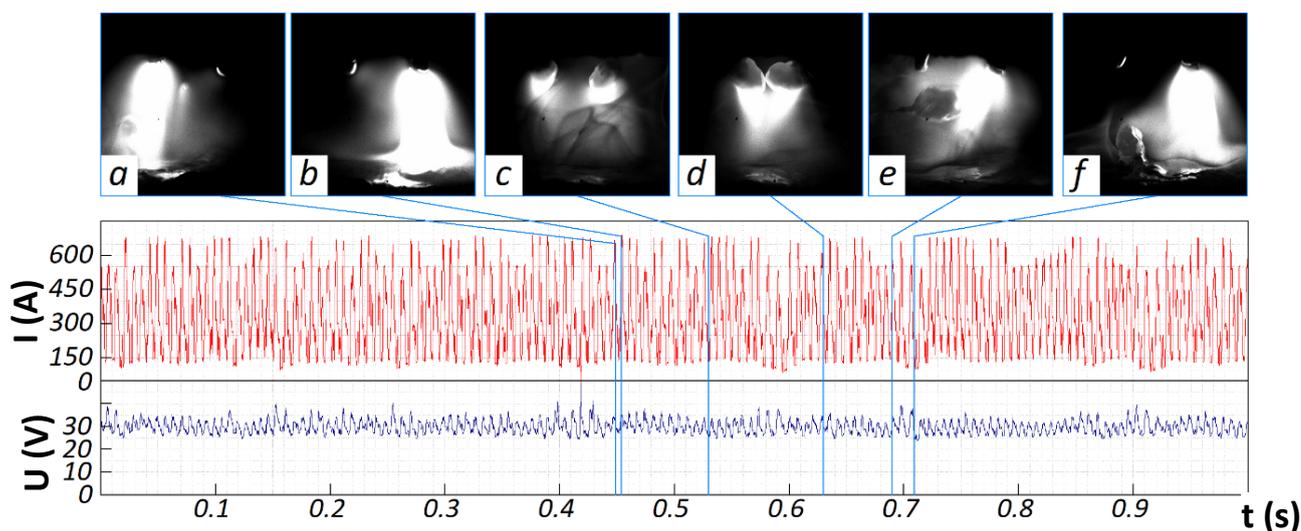


Рис. 7. Внешний вид осциллограммы импульсного тока и напряжения, а также кадры высокоскоростной видеосъемки ($I=280\text{ A}$; $U_0=30\text{ B}$)
Fig. 7. External appearance of the oscillogram of the pulse current and voltage and high-speed video footage ($I=280\text{ A}$; $U_{arc}=30\text{ V}$)

за счет увеличения частоты импульсов до 166 Гц и повышения силы базового тока до 120 А.

Увеличение силы тока приводит к повышению электродинамической силы, которая стремится притянуть капли друг к другу. Возникающее усилие в момент импульса раскачивает их, из-за чего капли колеблются на торце электрода и отрываются несинхронно. Это приводит к тому, что в момент, когда капля смещается к оси симметрии электрода, под действием пинч-эффекта импульс тока отрывает ее, придавая вращательное движение. При столкновении в общую каплю из-за высокой скорости они разбиваются, что нарушает процесс каплепереноса (рис. 8).

Из результатов моделирования следует, что характерный импульс тока начинается с плавного линейного нарастания с 85 до 600 А за 1,5 мс. В этот момент область максимальной температуры перемещается вверх по оси электрода, как и точка пересечения встречных потоков, при этом увеличивается их интенсивность (рис. 9, кадр *a*). Распределение давления в дуге импульсного тока отличается от дуги постоянного тока. По мере нарастания импульса формируются две зоны максимума давления: в области анодного пятна – 620 Па и в зоне пересечения потоков под углом $\approx 130^\circ$ – 517 Па (рис. 9, кадр *e*).

После стабилизации тока на уровне 600 А в течение 0,8 мс («горячая» фаза импульса) поток плазмы приобретает перпендикулярное направление относительно оси проволоки из-за увеличения электродинамической силы притяжения. Температура вблизи анодного пятна достигает максимума – 24 987 К (рис. 9, кадр *b*). В этой же области и наблюдается повышенная плотность линий вектора тока. Давление на поверхности модельной пластины составляет 826 Па (рис. 9, кадр *f*), что ниже²,

чем значение давления дуги при сварке одной проволокой на постоянном токе (около 1000 Па).

Затем величина силы тока линейно снижается до 180 А за 0,7 мс (фаза «контроля тепловложения») и удерживается на этом уровне 1,4 мс. На этой стадии температура дуги снижается, а зона максимального нагрева смещается ближе к поверхности пластины (15 209 К) (рис. 9, кадр *c*). Поток плазмы перестает отклоняться в верхнюю часть дуги. Давление на поверхности пластины уменьшается до 329 Па (рис. 9, кадр *g*).

Финальная фаза – пауза продолжительностью 3,3 мс при значении тока 85 А («холодная» фаза). В этот момент фиксируется минимальное давление – 76 Па, а температурное поле сохраняет структуру (рис. 9, кадры *d*, *h*), аналогичную предыдущей фазе. Далее цикл повторяется.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что характер каплепереноса в режиме модулированного тока в целом подобен переносу при наплавке на постоянном токе обратной полярности. Среднее время переноса электродной капли составило 320 мс, что сопоставимо с ранее полученными данными [15], поэтому преимущество питания дуги модулированным током перед постоянным отсутствует.

Оценивая результаты, полученные при питании дуги импульсным током, следует отметить интересную особенность перехода общей капли в сварочную ванну с центростремительным ускорением под влиянием пинч-эффекта, возникающего в момент достижения наибольшей мощности импульса тока (при 600 А). В результате капля, вращаясь, попадает в сварочную ванну точно по оси сварочной проволоки. Это позволяет избежать частого дефекта – закристаллизовавшихся брызг и капель электродного металла на поверхности изделия как при двухэлектродной сварке в защитном газе, так и при одноэлектродной [16]. Дальнейшее

² Елсуков С.К. Повышение эффективности двухэлектродной наплавки в защитных газах хромоникелевых аустенитных сталей на детали нефтехимического оборудования: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2023. 143 с. EDN: [MEZKRU](https://doi.org/10.26907/2542-0419.2023.143).

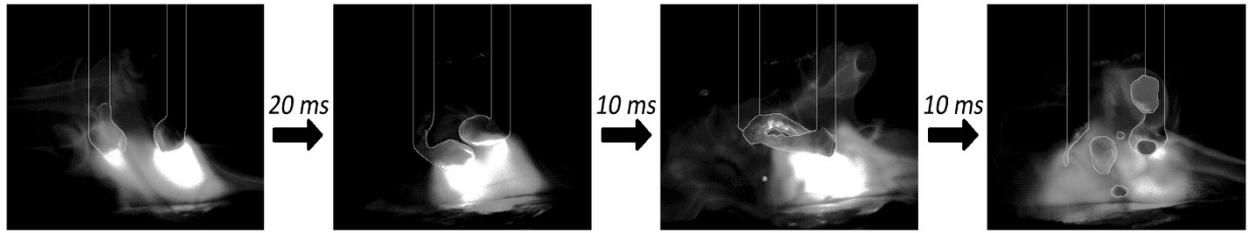


Рис. 8. Перекрестное перемещение электродных капель с нарушением каплепереноса ($I=350$ A; $U_0=30$ B)
 Fig. 8. Cross-movement of electrode drops with drop transfer disruption ($I=350$ A; $U_{arc}=30$ V)

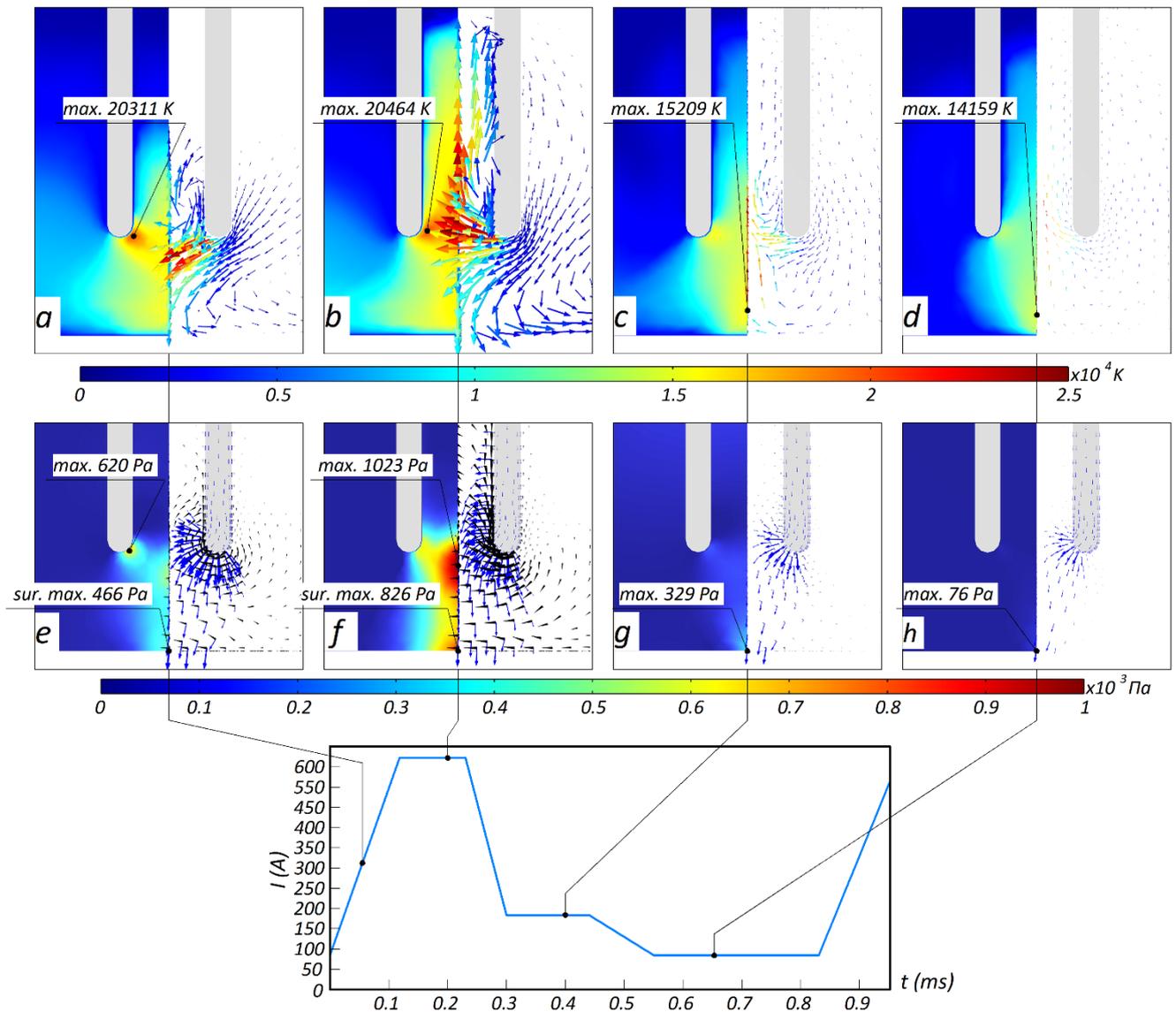


Рис. 9. Распределение температуры в модельной дуге, направления и скорости плазменного потока (a–d);
 распределение давления дуги, вектора плотности тока (синие стрелки)
 и вектора силы Лоренца (черные треугольники) (e–h) в зависимости от фазы цикла импульса тока
 Fig. 9. Distribution of temperature in the model arc, direction and plasma flow rate (a–d);
 distribution of arc pressure, current density vector (blue arrows)
 and Lorentz force vector (black triangles) (e–h) depending on the phase of the current pulse cycle

увеличение силы тока (до 350 А) нарушает стабильность формирования общей капли, что наблюдалось и при использовании в качестве защитного газа углекислоты [17]. Поэтому применение этого режима для наплавки нецелесообразно.

Математическое моделирование подтвердило характер взаимодействия сварочных дуг на двух проволоках и установило, что даже на стадии «горячей» фазы импульса тока (600 А, $t=0,8$ с) давление дуги на поверхности пластины меньше, чем при сварке одной проволокой при постоянном токе. Выявленный эффект связан с изменением направления потока на перпендикулярное к оси проволоки вследствие увеличения электродинамической силы притяжения магнитных полей вокруг двух проволочных проводников. В совокупности со снижением температуры дуги и давления на поверхность пластины в «холодной» фазе импульса тока (180 А, $t=1,4$ с) это должно способствовать уменьшению тепловложения и глубины проплавления основного металла, а следовательно, уменьшить степень разбавления наплавляемого сплава металлом подложки. Последнее особенно востребовано при решении задач по созданию технологии наплавки относительно тонких слоев из коррозионноустойчивых сплавов, в частности, на поверхности изделий нефтехимического оборудования.

Одной из перспектив развития рассматриваемого способа является более точное управление тепловложением в изделие с помощью изменения частоты импульсов или применения программы «двойной импульс» [18]. Как в случае применения постоянного тока, так и при использовании импульсного режима межэлектродное расстояние оказывает существенное влияние на процесс двухэлектродной наплавки, что также требует дальнейшего исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Установлено, что применение импульсного тока при двухэлектродной наплавке дает возможность расширить область существования переноса электродного металла общими каплями с 24 до 30 В при отсутствии замыканий дугового промежутка. В момент отрыва капли мощный импульс тока (~600 А) сообщает капле дополнительное центростремительное ускорение, направленное к поверхности сварочной ванны, что практически исключает разбрызгивание металла.

Проведенное математическое моделирование импульсной дуговой наплавки плавящимся электродом позволило выявить динамику изменения температуры и давления в различных фазах импульса, что важно для дальнейшей оптимизации процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Malinovska E., Pavelka V. Characteristics of welded joints produced by two wire submerged-arc welding // *Welding International*. 1990. Vol. 4. № 2. P. 157–163. DOI: [10.1080/09507119009447698](https://doi.org/10.1080/09507119009447698).
- Зорин И.В., Елсуков С.К., Соколов Г.Н., Дубцов Ю.Н., Лысак В.И., Харламов В.О. Исследование процесса наплавки расщепленным электродом сплава Inconel 625 // *Сварочное производство*. 2018. № 11. С. 9–15. EDN: [YULCSL](https://www.edn.ru/yulcsl).
- Майданчук Т.Б., Илюшенко В.М., Бондаренко А.Н. Улучшение качества биметаллического соединения при наплавке под флюсом высокооловянной бронзы на сталь // *Автоматическая сварка*. 2015. № 5-6. С. 42–45. EDN: [TVOTMJ](https://www.edn.ru/tvotmj).
- Мастенко В.Ю. Способ автоматической двухэлектродной наплавки проволоками под флюсом // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2006. № 8. С. 8–10. EDN: [HVBRJP](https://www.edn.ru/hvbrjp).
- Wang Xiaoli, Zhang Qi, Liu Yangsen, Luo Chengfu, Hu Qingxian. Impact of welding current on arc physical characteristics in single-power, double-wire, single-arc gas metal arc welding // *Welding in the World*. 2025. № 2. P. 1–12. DOI: [10.1007/s40194-025-01982-y](https://doi.org/10.1007/s40194-025-01982-y).
- Xu Jie, Ma Yiming, Wang Lin, Lu Xu. Numerical simulation of arc and metal transfer behaviors in double-wire gas metal arc welding // *Welding in the World*. 2022. Vol. 66. № 12. P. 2521–2531. DOI: [10.1007/s40194-022-01381-7](https://doi.org/10.1007/s40194-022-01381-7).
- Ding Xueping, Li Huan, Wei Huiliang, Liu Jiquan. Numerical analysis of arc plasma behavior in double-wire GMAW // *Vacuum*. 2016. Vol. 124. P. 46–54. DOI: [10.1016/j.vacuum.2015.11.006](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.11.006).
- Крампит А.Г., Зернин Е.А., Крампит М.А. Современные способы импульсно-дуговой MIG/MAG сварки // *Технологии и материалы*. 2015. № 1. С. 4–11. EDN: [TUHYSL](https://www.edn.ru/tuhysl).
- Rezende R.F., Arias A.R., Lima II E.J., Coelho F.G.F. Pulsed GMAW-based WAAM – Influence of droplet detachment mode on the geometry and mechanical properties of 308 L stainless steel // *Journal of Advanced Joining Processes*. 2025. Vol. 11. Article number 100286. DOI: [10.1016/j.jajp.2025.100286](https://doi.org/10.1016/j.jajp.2025.100286).
- Zhao Yangyang, Lee Phill-Seung, Chung Hyun. Effect of pulsing parameters on drop transfer dynamics and heat transfer behavior in pulsed gas metal arc welding // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 129. P. 1110–1122. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037).
- Liu Guonqiang, Han Siyuan, Tang Xinhua, Cui Haichao. Effects of torch configuration on arc interaction behaviors and weld defect formation mechanism in tandem pulsed GMAW // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 62. P. 729–742. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.01.007](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.007).
- Ueyama T., Ohnawa T., Nakata K., Tanaka M. Occurrence of arc interaction in tandem pulsed gas metal arc welding // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2007. Vol. 12. № 6. P. 523–529. DOI: [10.1179/174329307X173715](https://doi.org/10.1179/174329307X173715).
- Wu Kaiyuan, Wang Jijia, Yin Tong, He Zuwei, Liang Zhuoyong. Double arc interference and dynamic behavior characteristics of double wire double-pulsed GMAW // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 95. P. 991–1002. DOI: [10.1007/s00170-017-1269-y](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1269-y).
- Motta M.F., Dutra J.C. Effects of the variables of the double wire MIG/MAG process with insulated potentials on the weld bead geometry // *Welding International*. 2006. Vol. 20. № 10. P. 785–793. DOI: [10.1533/weli.2006.20.10.785](https://doi.org/10.1533/weli.2006.20.10.785).
- Елсуков С.К., Зорин И.В., Фастов С.А., Лысак В.И. Применение расщепленного электрода для наплавки

- в аргоноуглекислотных смесях коррозионностойкой стали // Сварка и диагностика. 2023. № 2. С. 37–40. EDN: [CYLBIS](#).
16. Потапьевский А.Г., Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. 208 с.
 17. Спицын В.В. Перенос металла и горение дуги при сварке расщепленным электродом в CO₂ // Сварочное производство. 1969. № 4. С. 5–7.
 18. Yao Ping, Zhou Kang, Huang Shuwei. Process and parameter optimization of the double-pulsed GMAW process // *Metals*. 2019. Vol. 9. № 9. Article number 1009. DOI: [10.3390/met9091009](#).
 9. Rezende R.F., Arias A.R., Lima II E.J., Coelho F.G.F. Pulsed GMAW-based WAAM – Influence of droplet detachment mode on the geometry and mechanical properties of 308 L stainless steel. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2025, vol. 11, article number 100286. DOI: [10.1016/j.jajp.2025.100286](#).
 10. Zhao Yangyang, Lee Phill-Seung, Chung Hyun. Effect of pulsing parameters on drop transfer dynamics and heat transfer behavior in pulsed gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 129, pp. 1110–1122. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037](#).
 11. Liu Guonqiang, Han Siyuan, Tang Xinhua, Cui Haichao. Effects of torch configuration on arc interaction behaviors and weld defect formation mechanism in tandem pulsed GMAW. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 62, pp. 729–742. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.01.007](#).
 12. Ueyama T., Ohnawa T., Nakata K., Tanaka M. Occurrence of arc interaction in tandem pulsed gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, vol. 12, no. 6, pp. 523–529. DOI: [10.1179/174329307X173715](#).
 13. Wu Kaiyuan, Wang Jijia, Yin Tong, He Zuwei, Liang Zhuoyong. Double arc interference and dynamic behavior characteristics of double wire double-pulsed GMAW. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95, pp. 991–1002. DOI: [10.1007/s00170-017-1269-y](#).
 14. Motta M.F., Dutra J.C. Effects of the variables of the double wire MIG/MAG process with insulated potentials on the weld bead geometry. *Welding international*, 2006, vol. 20, no. 10, pp. 785–793. DOI: [10.1533/weli.2006.20.10.785](#).
 15. Elsuков S.K., Zorin I.V., Fastov S.A., Lysak V.I. Applications of split electrode for surfacing in argon-carbonacid mixtures of corrosion-resistant steel. *Svarka i diagnostika*, 2023, no. 2, pp. 37–40. EDN: [CYLBIS](#).
 16. Potapevskiy A.G., Saraev Yu.N., Chinakhov D.A. *Svarka staley v zashchitnykh gazakh plavyashchimsya elektrodom. Tekhnika i tekhnologiya budushchego* [Welding of steels in protective gases with a melting electrode. Engineering and technology of the future]. Tomsk, Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta Publ., 2012. 208 p.
 17. Spitsyn V.V. Metal transfer and arc gorenje during welding with a split electrode in CO₂. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1969, no. 4, pp. 5–7.
 18. Yao Ping, Zhou Kang, Huang Shuwei. Process and parameter optimization of the double-pulsed GMAW process. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 9, article number 1009. DOI: [10.3390/met9091009](#).

REFERENCES

1. Malinovska E., Pavelka V. Characteristics of welded joints produced by two wire submerged-arc welding. *Welding International*, 1990, vol. 4, no. 2, pp. 157–163. DOI: [10.1080/09507119009447698](#).
2. Zorin I.V., Elsuков S.K., Sokolov G.N., Dubtsov Yu.N., Lysak V.I., Kharlamov V.O. Investigation of the alloy Inconel 625 deposition process by a split electrode. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2018, no. 11, pp. 9–15. EDN: [YULCSL](#).
3. Maydanchuk T.B., Ilyushenko V.M., Bondarenko A.N. Improving the quality of bimetallic compounds during submerged deposition of high-lead bronze on steel. *Avtomaticheskaya svarka*, 2015, no. 5-6, pp. 42–45. EDN: [TVOTMJ](#).
4. Mastenko V.Yu. Method of automatic two-electrode surfacing with submerged wires. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, 2006, no. 8, pp. 8–10. EDN: [HVBRIP](#).
5. Wang Xiaoli, Zhang Qi, Liu Yangsen, Luo Chengfu, Hu Qingxian. Impact of welding current on arc physical characteristics in single-power, double-wire, single-arc gas metal arc welding. *Welding in the World*, 2025, no. 2, pp. 1–12. DOI: [10.1007/s40194-025-01982-y](#).
6. Jie Xu, Yiming Ma, Lin Wang, Xu Lu. Numerical simulation of arc and metal transfer behaviors in double-wire gas metal arc welding. *Welding in the World*, 2022, vol. 66, no. 12, pp. 2521–2531. DOI: [10.1007/s40194-022-01381-7](#).
7. Ding Xueping, Li Huan, Wei Huiliang, Liu Jiquan. Numerical analysis of arc plasma behavior in double-wire GMAW. *Vacuum*, 2016, vol. 124, pp. 46–54. DOI: [10.1016/j.vacuum.2015.11.006](#).
8. Krampit A.G., Zernin E.A., Krampit M.A. Modern methods of pulsed-arc MIG/MAG welding. *Tekhnologii i materialy*, 2015, no. 1, pp. 4–11. EDN: [TUHYSL](#).

The influence of pulse current on drop transfer during double-electrode gas surfacing

Sergey K. Elsukov^{*1}, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Welding Production Equipment and Technology”

*Ilya V. Zorin*², Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor,
professor of Chair “Welding Production Equipment and Technology”

Dmitry S. Nesin, postgraduate student

Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia)

*E-mail: serzh.elsukov@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4965-8028>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9912-2598>

Received 14.04.2025

Revised 30.05.2025

Accepted 09.06.2025

Abstract: The application of a circuit with a common pulse current source for surfacing with two electrode wires increases the energy efficiency of the arc process and the welding arc technological properties, but requires a more detailed study of the influence of the mode parameters on its stability. In this regard, this paper focuses on studying the dynamics of formation and transfer of metal drops under various modes of pulsed power supply of the welding arc. Using high-speed video filming of the welding arc and synchronized recording of current and voltage signals, a mode was set (average current value was 250 A, maximum current value in pulse was 600 A, arc voltage was ~30 V), which ensured a stable process of transfer of electrode metal by a drop common to two wires without short circuits. It was found that the common drop under the action of electrodynamic forces acquires centripetal acceleration, which contributes to its directed transfer to the weld pool and allows minimizing the amount of spatter on the surface of the base metal. Using mathematical modeling, the nature of the interaction of welding arcs on two wires was confirmed and it was found that even at the stage of the current pulse “hot” phase (600 A, $t=0.8$ s), the arc pressure on the plate surface is less than when welding with one wire at direct current. The identified effect is associated with a change in the direction of the plasma flow to perpendicular to the wire axis due to an increase in the electrodynamic attractive force of the magnetic fields around the two wire conductors. Together with a decrease in the arc temperature and pressure on the plate surface during the “heat input control” phase of the current pulse (180 A, $t=1.4$ s), this should help to reduce the heat input and the depth of penetration of the base metal, and, consequently, reduce the degree of dilution of the deposited alloy by the substrate metal. The latter is especially relevant when solving problems of creating a technology for surfacing of relatively thin layers of corrosion-resistant alloys, in particular, on the surface of petrochemical equipment products.

Keywords: double-electrode surfacing; pulse-arc process; welding arc; drop transfer; numerical simulation.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-23-20068 (<https://rscf.ru/project/24-23-20068/>) and the Volgograd Region Administration grant under agreement No. 7 dated May 31, 2024.

For citation: Elsukov S.K., Zorin I.V., Nesin D.S. The influence of pulse current on drop transfer during double-electrode gas surfacing. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 2, pp. 9–18. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-1.