

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ АНАЛИЗЕ РЕЖИМОВ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ

А.В. ЯРОВИЦЫН

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

На основе оценки значения определенного интеграла величины сварочного тока за время горения дуги на изделии предложена новая методика анализа режимов микроплазменной порошковой наплавки. Она реализуется посредством цифровой обработки сигналов с датчиков тока и напряжения с гальванической развязкой от сварочного контура, зарегистрированных с помощью аналогово-цифрового преобразователя. Ее алгоритм позволяет для различных моделей специализированного наплавочного оборудования в условиях варьирования величины сварочного тока и ряда стационарных технологических параметров оценивать количество введенного в анод тепла и соотносить его со склонностью изделий из никелевых жаропрочных сплавов к образованию микро- или макротрещин при сварке плавлением. Установлено, что при ограниченном сварочном токе общие тепловложения микроплазменной дуги в анод пропорциональны объему сварочной ванны и производительности наплавки. На примере многослойной наплавки торца пера лопаток газотурбинных двигателей из сплавов ЖС32 и ЖС26 показано, что оптимизация общего количества введенной тепловой энергии позволяет предотвратить образование микротрещин в таком сварном соединении. Библиогр. 22, рис. 8.

*Ключевые слова:* системы сбора данных; анализ режимов; микроплазменная порошковая наплавка; никелевые жаропрочные сплавы; количество тепла, введенного в анод; склонность к образованию микротрещин при сварке плавлением

Для изучения особенностей горения сварочных дуг, закономерностей переноса электродного металла, а также тестирования сварочного оборудования длительное время применяется измерение, запись и математическая обработка электрических параметров сварочной дуги [1–10].

В конце 80-х гг. 20 ст. в ИЭС им. Е.О. Патона под руководством академика И.К. Походни разработаны методические основы статистического анализа осциллограмм электрических параметров сварочных дуг обратной полярности [1, 2]. Для оценки стабильности их горения в промежутке между короткими замыканиями вычислялись значения среднеквадратического отклонения  $\sigma$  и коэффициента вариации  $K_V$  для сварочного тока  $I$ , напряжения  $U$  и времени коротких замыканий  $\tau$ . Как правило, осциллографирование электрических параметров дуги выполнялось с частотой 0,1...20 кГц, а размеры выборки ограничивались временем регистрации 20...40 с ввиду набора достаточного количества статистических данных. Данная методика позволила выполнять сравнительную оценку [2–4]:

- технологических свойств различных моделей сварочного оборудования для сварки плавящимся электродом по критерию  $K_V^I, K_V^U, K_V^\tau \rightarrow \min$ ;
- стабильности горения дуги для различных марок сварочных электродов и проволок по критерию  $K_V^U, \tau \rightarrow \min$ ;
- стабильности горения плазменных дуг прямой полярности за непрерывный промежуток времени.

В последнее время стали широко применяться для записи, обработки и анализа технологических параметров сварочной дуги системы сбора данных (Data Acquisition Systems) [5–10], которые позволяют:

- измерять сигналы тока и напряжения с помощью датчиков с гальванической развязкой от цепи сварочного контура;
- регистрировать их с дискретной частотой до 100...200 кГц/канал практически неограниченное время при помощи 2...16 каналов записи аналогово-цифровых преобразователей (АЦП);
- в специализированных программах проводить цифровую обработку и анализ электрических сигналов, соответствующих технологическим параметрам процесса: ток сварки, напряжение на дуге, скорость подачи электродной проволоки, перемещение сварочной головки, расход защитного газа и др.

Базовое методическое обеспечение систем сбора данных [1–4] дополнилось построением динамических вольт-амперных характеристик дуги [5], применением преобразований Фурье для частотного анализа массопереноса электродного металла [5, 6], нейронных сетей для оптимизации сварочных параметров в ходе горения дуги [7].

На современном этапе такие системы являются высокотехнологичным средством регистрации основных параметров сварочных процессов, которые позволяют наряду с их мониторингом [8] и анализом качества сварочного оборудования [9] также оптимизировать технологическое управление сварочной дугой [10].

В сварочном производстве традиционной является задача установления взаимосвязи между параметрами сварки/наплавки и размерами, качеством сварных соединений. В ряде случаев при нестационарных режимах горения дуги их технологическая коррекция затруднена. Для объективного анализа и оптимизации таких режимов требуется формирование специализированных критериев их оценки. В данной статье предлагается к рассмотрению методика оценки параметров режима нестационарного процесса микроплазменной наплавки, основанная на использовании систем сбора данных.

Процесс микроплазменной порошковой наплавки [11, 12] используется в производстве при серийном ремонте рабочих лопаток авиационных ГТД [13, 14] из ограниченно свариваемых никелевых жаропрочных сплавов с высоким содержанием  $\gamma'$ -фазы [15, 16]. Он характеризуется величиной сварочного тока до 35 А, эффективной мощностью микроплазменной дуги до 650 Вт, количеством локально подаваемой дисперсной присадки до 9 г/мин. Актуально расширение его технологических возможностей — многослойная наплавка и наплавка смежных валиков [17]. В процессе отработки технологии наплавки в сварном соединении могут возникать макро- или микротрещины [14], обнаруживаемые капиллярным и/или металлографическим контролем. В связи с этим возникает необходимость оптимизации как режимов предварительной и последующей термической обработки, так и собственно процесса на-

плавки с целью обеспечения качества и необходимых свойств сварных соединений.

В зависимости от ширины узкой подложки [18]  $\delta = 0,8 \dots 5,0$  мм и требуемой высоты наплавленного валика в указанном выше диапазоне сварочный ток и количество вводимого в сварочную ванну порошка выбираются и периодически регулируются [12], исходя из технических возможностей соответствующего оборудования для:

- ограничения глубины проплавления менее 2 мм;
- обеспечения на переднем фронте наплавки угла смачивания основного и наплавляемого металла в пределах  $20 \dots 70^\circ$ .

Особенности изменения сварочного тока на локальном участке обусловлены последовательным формированием сечения наплавляемого валика, а в целом для изделия — геометрией восстанавливаемого конструктивного элемента лопатки (рис. 1). Таким образом, для данного процесса основными технологическими факторами варьирования его параметров являются [11–14]:

- виды и амплитуда варьирования сварочного тока (постоянный, импульсный);
- способы подачи порошка (порционная, непрерывная);
- диаметры каналов сопел плазмотрона;
- расходы плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов;
- составы защитного газа (в системе  $Ar + (0 \dots 10\%) H_2$ ).

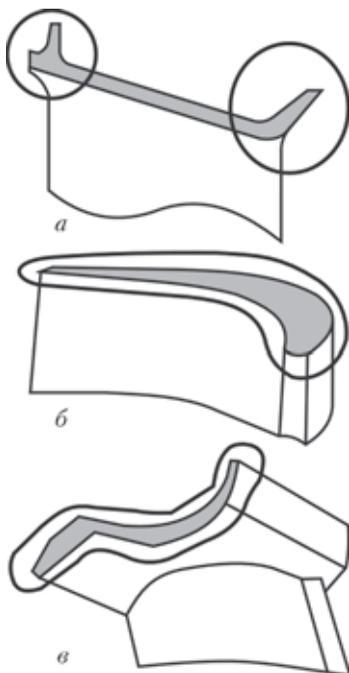


Рис. 1. Основные типы профилей наплавляемых лопаток авиационных ГТД. Оперативная коррекция режима наплавки требуется на выделенных участках

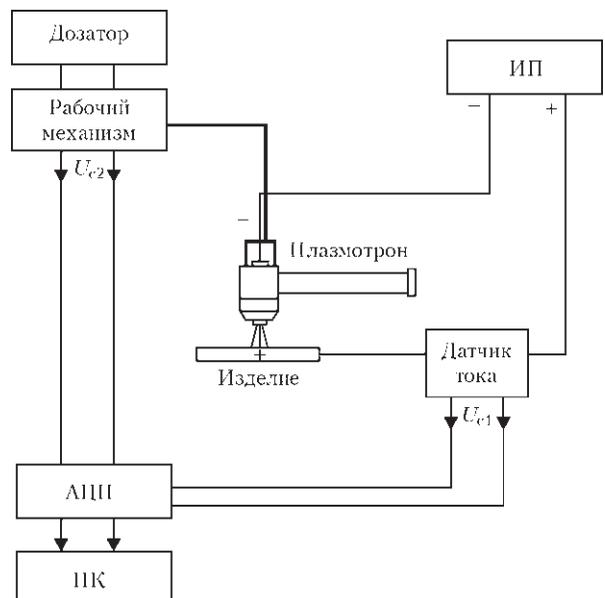


Рис. 2. Схема измерений и регистрации параметров режима микроплазменной порошковой наплавки. Обозначения: АЦП — аналогово-цифровой преобразователь; ПК — персональный компьютер;  $U_{c1}$  и  $U_{c2}$  — измеренные сигналы напряжения с датчика тока и рабочего механизма порошкового дозатора

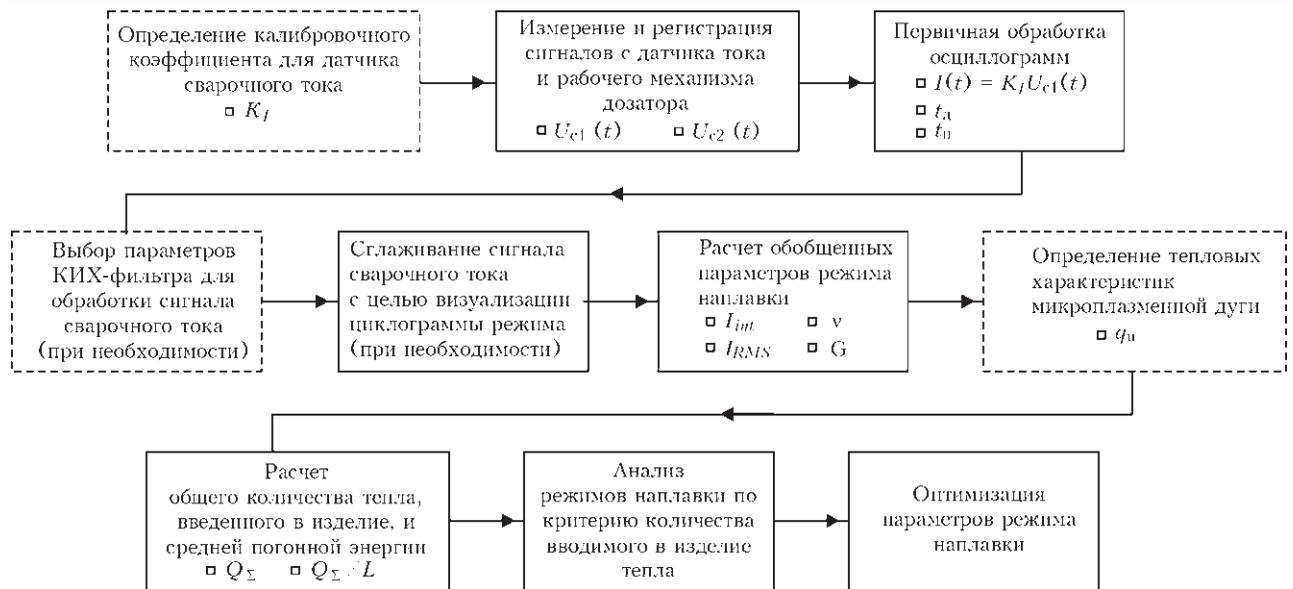


Рис. 3. Алгоритм цифровой обработки сигналов при анализе и оптимизации режимов микроплазменной порошковой наплавки. Пунктиром обозначены этапы предварительной подготовки

Выше перечисленные переменные факторы крайне затрудняют субъективный анализ и выбор возможных технологических вариантов наплавки.

В ИЭС им. Е.О. Патона разработана и опробована специальная методика регистрации и анализа параметров режимов микроплазменной порошковой наплавки с помощью системы сбора данных. Она позволяет соотносить склонность к образованию микро- и макротрещин, выявляемую в сварном соединении основной-наплавленный металл капиллярным и металлографическим контролем, с количеством введенного в изделие тепла в процессе наплавки.

Схема измерения, записи сигналов технологических параметров и алгоритм их цифровой обработки приведены на рис. 2, 3. В системе сбора данных использовались:

- АЦП, позволяющий выполнять регистрацию сигналов с частотой 1...10 кГц/канал;
- датчики тока фирмы «LEM», рассчитанные на измерение сварочного тока до 100 А;
- датчик напряжения LV-25P для записи сигнала  $U_{c2}$  с рабочего механизма дозатора, обеспечивающего подачу дисперсной присадки в процессе наплавки;
- программа PowerGraph 3.3 для цифровой обработки и анализа данных.

В результате первичной обработки осциллограмм сигналов, измеренных и записанных в сварочном контуре в процессе наплавки изделия, определялась форма зависимости  $I(t)$ , а также время горения микроплазменной дуги на изделии  $t_d$  и время подачи дисперсной присадки  $t_n$ . Внешний вид фрагментов таких осциллограмм сварочного тока для различных сварочных источников питания микроплазменной дуги представлен на рис. 4.

В случае записи сигналов нестабилизированного сварочного тока (рис. 4, б) визуальный анализ осциллограммы сварочного тока затруднен и требуется дальнейшая цифровая обработка соответствующего сигнала с помощью сглаживающего цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра) [19, 20]. Размер окна сглаживания выбирался исходя из условия сохранения амплитуды и формы импульсов сварочного тока (рис. 5, в). Погрешности, вносимые в данный сигнал цифровой обработкой, оценивались при вычислении среднеквадратичного значения и определенного интеграла для сварочного тока за фиксированный промежуток времени:

$$I_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i^2\right)}. \quad (1)$$

$$I_{int} = \int_0^t I dt. \quad (2)$$

Величина ошибок определялась для функций усреднения сигнала со следующими типами весовых коэффициентов  $W_i$  [20]: для среднеарифметического, треугольного и биквадратного окна. Их анализ показал, что интегральная характеристика сварочного тока  $I_{int}$ , при сглаживании практически не изменяется. Ошибка, вносимая в сигнал данным видом цифровой обработки, не превышает 0,2 %. На среднеквадратичное значение сварочного тока  $I_{RMS}$  в процессе цифровой обработки сигнала сварочного тока сглаживанием накладывается более существенная ошибка — до 15 %. Ее устранение возможно путем линейной корреляции.

Скорость наплавки  $v$  и количество поданной в плазматрон дисперсной присадки  $G$  рассчитыва-

лись исходя из времени горения микроплазменной дуги  $t_d$  и функционирования рабочего механизма дозатора  $t_{п}$ , определенных при первичной обработке осциллограммы режима:

$$v = \frac{L}{t_d}; \quad (3)$$

для непрерывной подачи:

$$G = G_0 t_{п}; \quad (4)$$

для порционной подачи:

$$G = M_0 N_{мп}; \quad (5)$$

где  $L$  — длина наплавленного валика;  $G_0$  — производительность работы дозатора при непрерывной подаче присадки;  $M_0$  — масса микропорции при порционной подаче дисперсной присадки;  $N_{мп}$  — количество микропорций порошка, поданных в плазматрон в процессе наплавки за время  $t_{п}$ .

Заключительным этапом предлагаемого алгоритма анализа режимов наплавки является опре-

деление количества тепла  $Q_{\Sigma}$ , вводимого в изделие. Известно, что удельные тепловложения сварочных дуг характеризуются эффективной мощностью нагрева изделия  $q_{и}$  [21]. В диапазоне оптимальной тепловой нагрузки плазмотрона (ПВ = 100 %) зависимость  $q_{и}(I)$  линейная [11, 12, 18] и описывается уравнением:

$$q_{и} = k_q I \pm c_q, \quad (6)$$

где  $k_q$  и  $c_q$  — коэффициенты линейной регрессии. Тогда с учетом зависимостей (2, 6) величину  $Q_{\Sigma}$  можно определить следующим образом:

$$Q_{\Sigma} = \int_0^{t_d} q_{и} dt = k_q I_{int} \pm c_q t_d, \quad (7)$$

а среднюю погонную энергию при наплавке валика как  $Q_{\Sigma}/L$ .

Варьирование таких стационарных технологических параметров процесса микроплазменной порошковой наплавки как соотношение диаме-

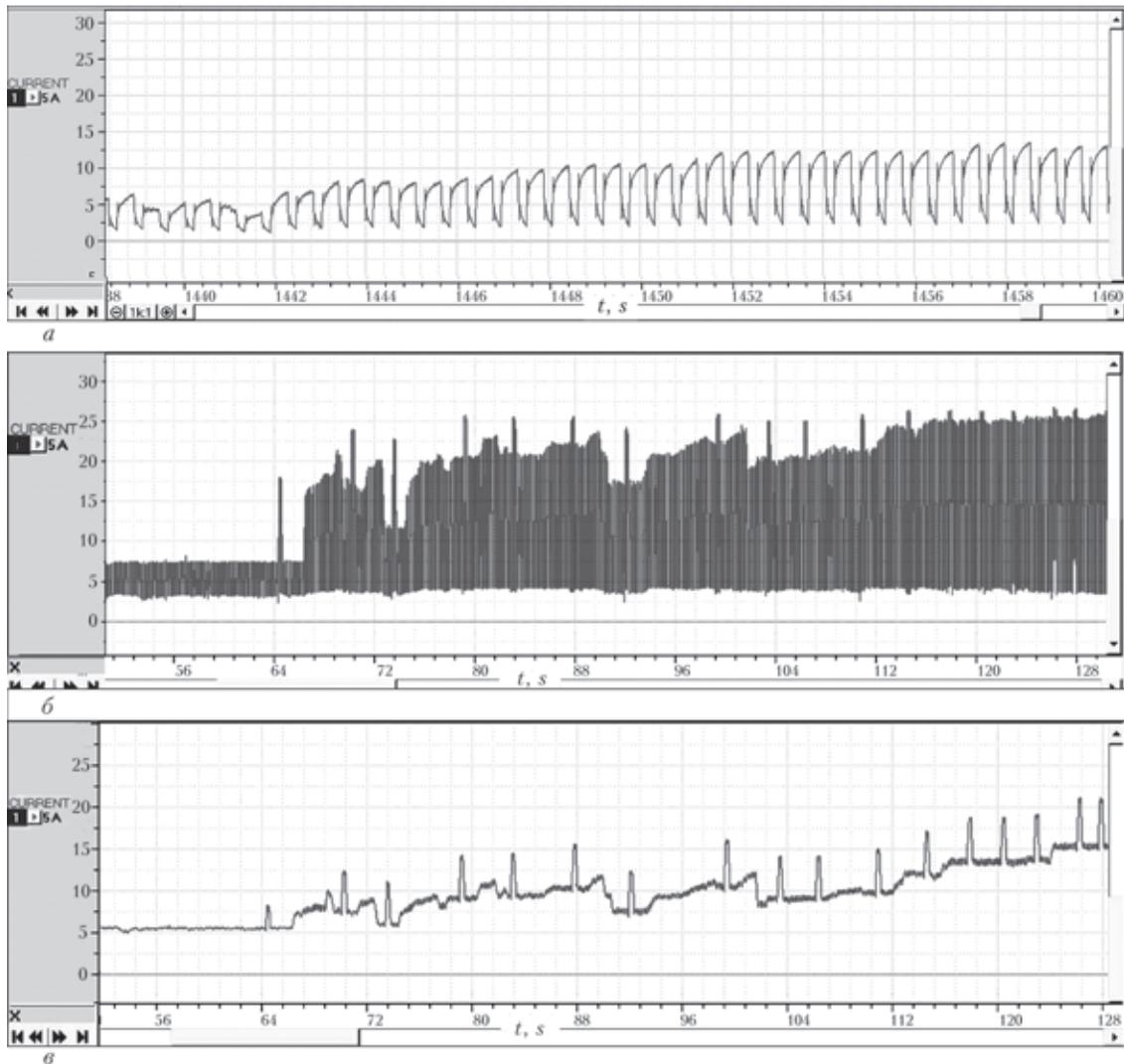


Рис. 4. Внешний вид фрагментов циклограммы режима микроплазменной порошковой наплавки  $I(t) = U_{cl}(t)K_I$  после первичной цифровой обработки, частота регистрации сигнала 2,5 кГц: а — стабилизированный сварочный ток, установка STARWELD PTA 190H фирмы «Kennametal Stellite GmbH»; б, в — нестабилизированный сварочный ток, установка УПНС-304М2/М3, частота пульсаций сварочного тока 150 Гц

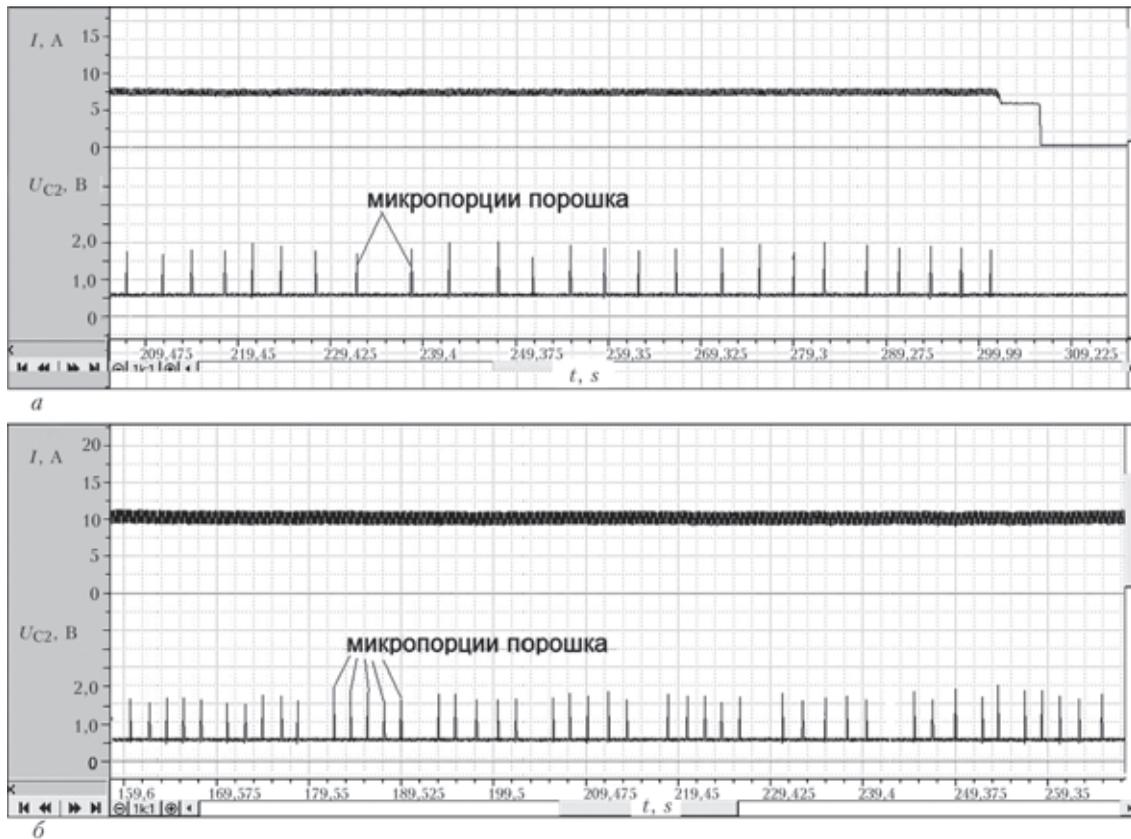


Рис. 5. Фрагменты осциллограмм микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку  $\delta = 1,6$  мм с различным количеством микропорций дисперсной присадки, вводимой в сварочную ванну, шт.: а — 1; б — 5

тров каналов сопел плазмотрона, расход технологических газов, состав защитного газа отражается на тепловых характеристиках микроплазменной дуги [12] и предварительно учитывается при экспериментальном определении зависимости  $q_n(I)$  по методике проточного калориметрирования [12, 18]. Следует отметить, что ввиду несоответствия условий горения микроплазменной дуги на водоохлаждаемом медном аноде и при реальной наплавке с образованием сварочной ванны определяемая нами величина  $Q_{\Sigma}$  будет иметь некоторую систематическую погрешность. Ее значение согласно данным работы [22] примерно оценивается как +7 %.

Таким образом, через значение определенного интеграла величины сварочного тока учитываются нестационарные процессы его изменения за время горения дуги, в том числе и для импульсных режимов с разными принципами их реализации. Через использование коэффициентов  $k_q$  и  $c_q$  линейной регрессии  $q_n(I)$  при расчете введенного в анод тепла — с приемлемой точностью большинство возможных сочетаний стационарных технологических параметров микроплазменной дуги. Представленная в статье методика энергетического анализа позволяет оценивать вводимое количество тепла не только для наплавки изделия в целом, но и на любом его локальном участке (вплоть до размеров сварочной ванны). В сочета-

нии с определением массы наплавленного металла взвешиванием и измерением глубины проплавления основного металла она также позволяет при порционной подаче присадки оценить ряд ниже приведенных параметров, характеризующих размеры и энергетику сварочной ванны.

Объем наплавленного металла в сварочной ванне:

$$V_{\text{вн}} = \frac{M_{\text{н}}}{\rho(N_{\text{мп}} / N_0 - k_n)}, \quad (8)$$

где  $M_{\text{н}}$  — масса наплавленного металла;  $\rho$  — плотность наплавленного материала;  $N_0$  — количество микропорций присадки в одной серии наполнения сварочной ванны;  $k_n = 1$  — коэффициент, учитывающий поправку на начальный этап формирования валика.

Длина участка сварочной ванны на основном металле:

$$L_0 = \frac{Lk_0}{(N_{\text{мп}} / N_0 - k_n)}, \quad (9)$$

где  $L$  — длина наплавленного валика;  $k_0 = 2$  — коэффициент, учитывающий перекрытие объемов расплавленного металла при смещении сварочной ванны.

Объем переплавляемого основного металла:

$$V_{\text{во}} = L_0 h_0 \delta \quad (10)$$

где  $h_0$  — глубина проплавления основного металла;  $\delta$  — ширина узкой подложки.

Общий объем сварочной ванны:

$$V_B = V_{BH} + V_{BO} \quad (11)$$

Термический КПД [21] для наплавляемого металла:

$$\eta_{TH} = \frac{M_{II} H_M}{q_H} \quad (12)$$

где  $H_M$  — удельная энтальпия 1 г наплавленного металла.

Для выявления общих закономерностей изменения вводимой в изделие тепловой энергии от мощности микроплазменной дуги и размеров сварочной ванны выполнена серия опытов по наплавке на узкую подложку из аустенитной нержавеющей стали шириной  $\delta = 1,6$  мм при  $I = 6 \dots 13$  А. В качестве дисперсной присадки использовался порошок сплава ЖС32 фракцией 63...160 мкм. Объем сварочной ванны в разных опытах последовательно увеличивался за счет ввода серий от 1 до 6 микропорций присадки (рис. 5). Частота порционной подачи порошка и величина сварочного тока в указанном диапазоне выбирались таким образом, чтобы обеспечить на переднем фронте наплавки угол смачивания основного и наплавляемого металла в  $30 \dots 60^\circ$  и ограничить глубину проплавления основного металла в пределах 2 мм.

На данном примере в диапазоне сварочных токов  $I = 6 \dots 13$  А и эффективной мощности нагрева изделия  $q_H = 140 \dots 260$  Вт с помощью предлагаемой методики удалось уточнить область оптимальных режимов наплавки, которая соответствует сварочному току 9...10 А и высоте наплавленного валика 3,0...3,5 мм (определяли как расстояние от линии сплавления с основным металлом до верхней границы валика) (рис. 6). В остальных случаях наблюдается рост тепловложений в изделие, обусловленный снижением скорости наплавки менее 0,85...0,90 м/ч вследствие увеличения времени:

- нагрева образца микроплазменной дугой в промежутках между вводом микропорций порошка (до 6...8 с), необходимого для стабильного формирования наплавляемого валика;

- необходимого для ввода в сварочную ванну 4...6 микропорций дисперсной присадки при дальнейшем увеличении объема наплавляемого валика (до 12...18 с).

Расчеты, выполненные по зависимостям (8)–(12) для наплавленного металла ЖС32 ( $H_M = 861,2$  Дж, вычисленная на основании работ [18, 23, 24]) позволили проанализировать закономерности изменения эффективной мощности нагрева изделия  $q_H$ , термического КПД для наплавляемого металла  $\eta_{TH}$  и доли основного металла  $\gamma_0$  в зави-

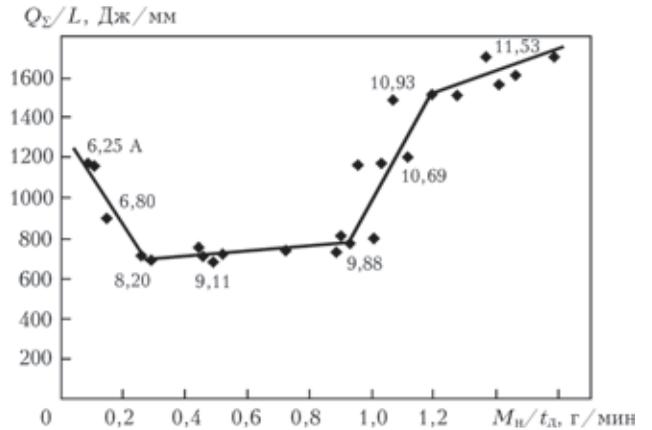


Рис. 6. Зависимость погонной энергии  $Q_{\Sigma}/L$  от производительности  $M_{II}/t_d$  и изменения средней величины сварочного тока при наплавке на узкую подложку шириной 1,6 мм

симости от объема сварочной ванны для серии описанных выше экспериментов. Они свидетельствуют (рис. 7), что начиная с некоторой величины  $q_H$ , несколько большей минимального возможного значения для начала стабильного процесса наплавки, объем сварочной ванны может увеличиваться в 5...6 раз за счет ввода в нее дисперсной присадки. При этом удельные тепловложения в анод и доля основного металла в сварочной ванне существенно не изменяются. В условиях ограниченной мощности дуги длительность наплавки валика зависит от времени пребывания металла сварочной ванны в расплавленном состоянии, которое в свою очередь определяется продолжитель-

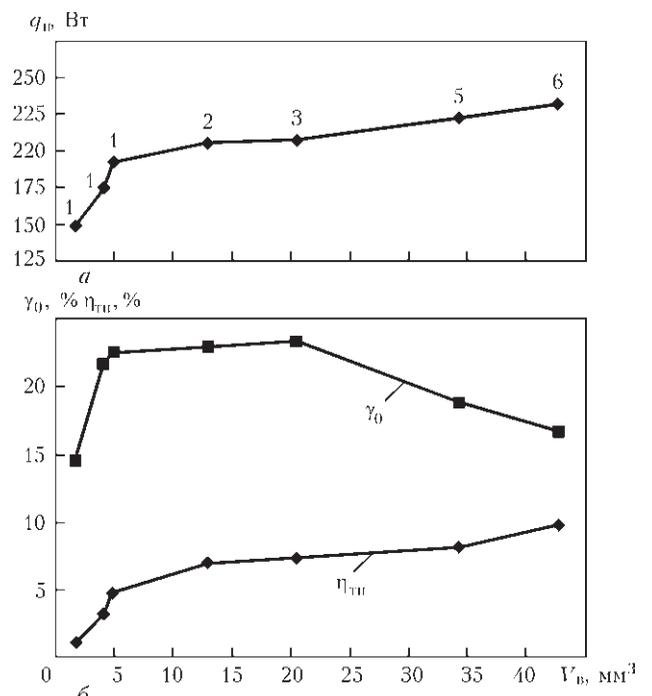


Рис. 7. Зависимость эффективной мощности нагрева изделия  $q_H$  (а), доли основного металла  $\gamma_0$  и термического КПД для наплавляемого металла  $\eta_{TH}$  (б) от объема сварочной ванны  $V_B$  при наплавке на узкую подложку шириной 1,6 мм (цифрами обозначено количество вводимых в сварочную ванну микропорций дисперсной присадки)

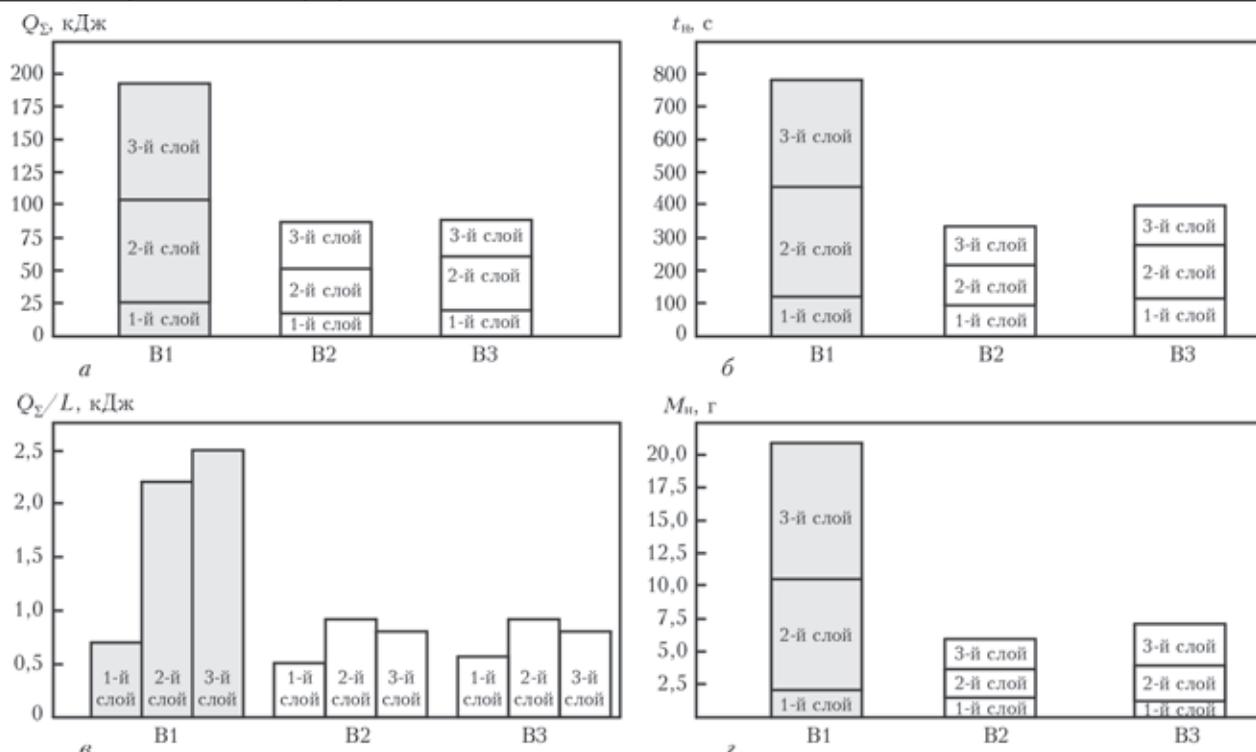


Рис. 8. Закономерности изменения количества тепла  $Q_{\Sigma}$ , вводимого в изделие, времени наплавки  $t_{\text{н}}$  и средней величины сварочного тока  $I$  при коррекции режимов наплавки узкой подложки переменной ширины  $\delta = 2,5 \dots 6,0$  мм: B1 — установка УПНС-304M2/M3, защитный газ  $\text{Ar} + 10\% \text{H}_2$ ; B2 — установка УПНС-304M2/M3, защитный газ  $\text{Ar} + 5\% \text{H}_2$ ; B3 — установка STARWELD PTA 190H фирмы «Kennametal Stellite GmbH», защитный газ  $\text{Ar}$ . Присадочный порошок — сплав ЖС32. Темным цветом выделен режим наплавки, где проявляется склонность к образованию микротрещин

ностью серии порционного ввода присадки (см. рис. 5). Поэтому количество вводимого в изделие тепла пропорционально времени наплавки валика, соответственно — объему ванны и массе наплавляемого металла. Ввиду известной зависимости длительности пребывания металла сварочной ванны в расплавленном состоянии от величины погонной энергии [21] для режимов микроплазменной порошковой наплавки может потребоваться оптимизация их параметров по критерию объема сварочной ванны (массы наплавленного металла).

Изложенный выше подход был применен для анализа режимов многослойной микроплазменной порошковой наплавки торца пера пустотелых небандажированных лопаток из сплавов ЖС32 и ЖС26 (см. рис. 1, б). На стадии отработки технологии он позволил оптимизировать тепловложения в изделие при среднем сварочном токе 11...16 А за счет ограничения размеров сварочной ванны, массы наплавленного металла и длительности наплавки слоя по критерию средней погонной энергии  $Q_{\Sigma}/L < 1$  кДж/мм (рис. 8, технологические варианты B2 и B3). По результатам металлографического контроля это позволило предотвратить образование микротрещин (см. рис. 8, B1) при 3-х слойной наплавке сплава ЖС32 на узкую подложку  $\delta = 2,5 \dots 6,0$  мм. Коррекция режимов была реализована на 2-х видах специализированного оборудования с различными

принципами построения импульсного режима (см. рис. 4, а, б) и подачи дисперсной присадки.

### Выводы

На примере анализа режимов наплавки на узкую подложку шириной 1,6 мм установлено, что начиная с некоторой величины эффективной мощности микроплазменной дуги, несколько большей минимально возможного значения для начала стабильного процесса, объем сварочной ванны без существенного увеличения мощности дуги может возрастать в 5...6 раз за счет увеличения количества вводимой дисперсной присадки. Так как общие тепловложения в изделие пропорциональны размерам сварочной ванны и производительности наплавки, может потребоваться оптимизация режимов микроплазменной наплавки по критериям массы наплавленного металла и погонной энергии.

Применение разработанной методики оценки и анализа количества тепла, введенного в изделие, позволило на стадии отработки технологии устранить образование микротрещин в наплавленном металле при 3-х слойной наплавке торца пера шириной 2,5...6,0 мм применительно к пустотелым небандажированным лопаткам из сплавов ЖС32 и ЖС26. Оптимизация общих тепловложений в анод по критериям  $Q_{\Sigma}/L < 1$  кДж/мм и  $M_{\text{н}} < 3$  г была реализована на 2-х видах специализированного обо-

рудования с различными принципами построения импульсного сварочного тока и способом подачи дисперсной присадки.

1. *Статистическая оценка переноса металла и стабильность горения сварочной дуги: Методические рекомендации.* – Киев: Ин-т электросварки им. Е.О. Патона, 1988. – 30 с.
2. *Критерии оценки стабильности процесса дуговой сварки на постоянном токе / И.К. Походня, И.И. Заруба, В.Е. Пономарев, Н.В. Илюшенко, Т.А. Гвенетрадзе и др. // Автомат. сварка.* – 1989. – № 8. – С. 1–4.
3. *Методы сравнительной оценки технологических свойств сварочного оборудования и материалов / И.К. Походня, И.И. Заруба, В.Е. Пономарев, В.П. Латанский и др. // Там же.* – 1990. – № 5. – С. 1–5.
4. *Киревский И.Е., Амосов А.П., Попов В.В.* Нарушение стабильности горения сжатой дуги // *Свароч. пр-во.* – 1997. – № 4. – С. 23–24.
5. *Специализированный комплекс для мониторинга процесса сварки / А.Е. Пирумов, И.О. Скачков, С.А. Супрун, С.Ю. Максимов // ПиКАД.* – 2007. – № 4. – С. 18–19.
6. *Akinci T.C.* Time-frequency analysis of the current measurement by Hall effect sensors for electric arc welding machine // *Mechanica.* – 2010. – № 5(85). – P. 66–71.
7. *Akinci T.C., Noğay H.S., Gökmen G.* Determination of optimum operation cases in electric arc welding machine using neural network // *J. of Mechanical Science and Technology.* – 2011. – № 25(4) – P. 1003–1010.
8. *Online monitoring, analysis and remote recording of welding parameters to welding diary / A. Lebar, L. Selak, R. Vrabčić, P. Butala. // J. of Mechanical Engineering.* – 2012(58). – № 7-8. – P. 444–452.
9. *Патон Б.Е., Коротынский А.Е., Скопюк М.И.* Система оперативного контроля качества сварочного оборудования в процессе его промышленного производства // *Автомат. сварка.* – 2002. – № 5. – С. 29–31.
10. *Ланкин Ю.Н., Рябцев И.А., Соловьев В.Г.* Влияние электрических параметров дуговой наплавки порошковой проволокой на стабильность процесса и проплавление основного металла // *Там же.* – 2014. – № 9. – С. 27–31.
11. *Особенности малоамперной аргонодуговой и микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку / А.В. Яровицын, К.А. Ющенко, А.А. Наконечный, И.А. Петрик / Там же.* – 2009. – № 6. – С. 37–42.
12. *Яровицын О.В.* Мікроплазмові порошкові наплавлення жароміцних нікелевих сплавів з вмістом  $\gamma'$ -фази 45...65 %. Автореф. дис. канд. техн. наук. — Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2009. – 21 с.
13. *Технологический семинар Deloro Stellite в Запорожье // Автомат. сварка.* – 2010. – № 1. – С. 59–62.
14. *Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / К.А. Ющенко, В.С. Савченко, А.В. Яровицын и др. / Там же.* – 2010. – № 8. – С. 25–29.
15. *Сорокин Л.И., Лукин В.И., Багдасаров Ю.С.* Свариваемость литейных жаропрочных сплавов типа ЖС6 // *Свароч. пр-во.* – 1997. – № 6. – С. 12–17.
16. *Сорокин Л.И.* Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов // *Там же.* – 1999. – № 12. – С. 11–17.
17. *Ющенко К.А., Яровицын А.В.* Совершенствование технологии восстановления верхней бандажной полки рабочих лопаток авиационного ГТД / Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин». Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. – Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2012. – С. 506–509.
18. *Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А.* Плазменная наплавка. – Киев: «Екотехнологія», 2007. – 292 с.
19. *Кестер У.* Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов. – М.: Техносфера, 2010. – 330 с.
20. *Измайлов Д.Ю.* PowerGraph. Справочник по функциям обработки сигнала. Ч. 2 // *ПиКАД.* – 2009. – № 2. – С. 26–28.
21. *Петров Г.Л., Тумарев А.С.* Теория сварочных процессов [с основами физической химии]. – М.: Высш. шк., 1967. – 508 с.
22. *Яровицын А.В., Новиков С.В.* Методическое обеспечение погружного калориметрирования малоамперных дуг // Зб. тезисів до V Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології», ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 27–29 травня 2009 р. – Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2009. – 124 с.
23. *Zhiguo Gao, Ojo O.A.* Modeling analysis of hybrid laser-arc welding of single-crystal nickel-base superalloys // *Acta Materialia.* – 2012. – № 60 – P. 3153–3167.
24. *Фрумин И.И.* Автоматическая электродуговая наплавка. – Харьков: Металлургиздат, 1961. – 421 с.

Поступила в редакцию 15.04.2015

## ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

В открытом доступе труды международных конференций

«Математическое моделирование и информационные технологии

в сварке и родственных процессах»,

проведенные в 2002, 2004, 2006, 2010, 2012 и 2014 гг:

<http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings/mmw>



Сборники можно  
заказать в  
редакции журнала  
«Автоматическая  
сварка».

