

# ОСОБЕННОСТИ МАЛОАМПЕРНОЙ АРГОНОДУГОВОЙ И МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ НА УЗКУЮ ПОДЛОЖКУ

**А. В. ЯРОВИЦЫН**, инж., академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **А. А. НАКОНЕЧНЫЙ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**И. А. ПЕТРИК**, канд. техн. наук (ОАО «Мотор-Січ», г. Запорожье)

Выполнен сравнительный анализ технологических характеристик малоамперной аргонодуговой и микроплазменной порошковой наплавки при многослойной наплавке на узкую подложку шириной 3,5 мм. Увеличение вязкости металла сварочной ванны за счет введения в нее дисперсного присадочного материала при многослойной микроплазменной порошковой наплавке позволяет увеличить погонную эффективную мощность нагрева, повысить высоту наплавленного слоя и снизить вероятность образования трещин в жаропрочных никелевых сплавах в результате повторных нагревов при многослойной наплавке.

*Ключевые слова:* малоамперная аргонодуговая наплавка, микроплазменная порошковая наплавка, многослойная наплавка на узкую подложку, технологические характеристики дуги, энергетические и тепловые характеристики, гидродинамическая модель сварочной ванны

К традиционно применяемым способам ремонтной сварки лопаток наземных и авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) из жаропрочных никелевых сплавов с высоким содержанием  $\gamma'$ -фазы относятся ручная малоамперная аргонодуговая наплавка (АДН) с присадочным материалом в виде проволоки [1–3] и лазерная наплавка с присадочным материалом в виде порошка [4]. В последнее время для ремонта изделий из жаропрочных никелевых сплавов также стали применять микроплазменную порошковую наплавку (МПН) [5–7], технологические возможности которой позволяют качественно выполнять широкий спектр восстановительных наплавки на кромках лопаток (рис. 1). Здесь проиллюстрированы сварные соединения с использованием однородного с основным металлом присадочного порошкового материала (с содержанием более 30...50 %  $\gamma'$ -фазы) и с использованием присадочного материала с более низкой прочностью при высоких температурах.

Таким образом, существует ряд технологических возможностей по ремонту кромок лопаток ГТД (рис. 2), когда возможен выбор между лазерной порошковой наплавкой, малоамперной АДН и МПН. Несмотря на множество публикаций по ремонту лопаток ГТД [1–7], целесообразно провести сравнительный

анализ технологических характеристик указанных процессов наплавки.

Особенностью ремонта кромок лопаток компонентов ГТД сваркой плавлением является вертикальная установка пера лопатки и наплавка валика на узкую подложку в условиях свободного формирования [1–7]. При такой наплавке для снижения склонности сварных соединений жаропрочных сплавов к образованию трещин в результате повторного нагрева стремятся к максимально возможной высоте (толщине) наплавленного слоя с целью уменьшения количества слоев наплавленного металла, что целесообразно также по технологическим соображениям для снижения

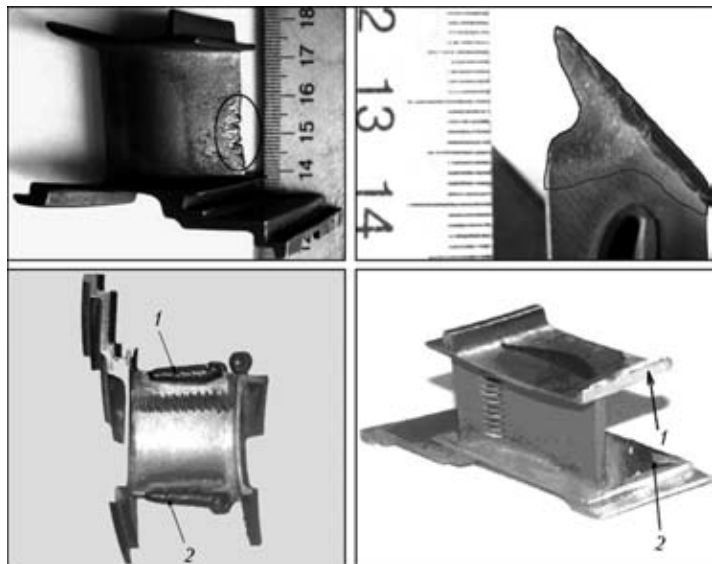


Рис. 1. Внешний вид эксплуатационных макроповреждений (выделено) и опытные наплавки (1, 2) по восстановлению поврежденных участков сопловой лопатки двигателя АИ-25ТЛ из сплава ЖС6У с содержанием 65 %  $\gamma'$ -фазы

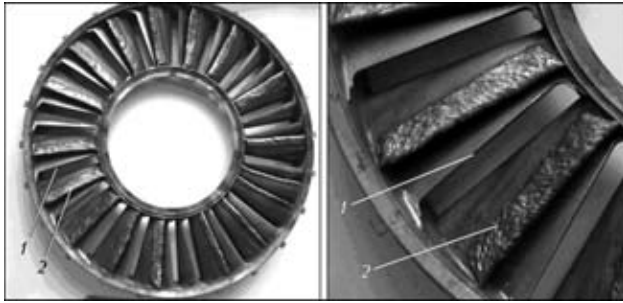


Рис. 2. Внешний вид соплового аппарата с лопатками, восстановленными способом МПН: 1 — разделка дефектного участка; 2 — восстановленная наплавкой лопатка

объема зачистных работ по устранению неровностей формирования валиков и снятию поверхностных оксидных пленок.

Процесс восстановления кромок лопаток способом лазерной порошковой наплавки [4] характеризуется применением многослойной наплавки со скоростью 0,1...0,8 м/мин и толщиной наплавленного слоя 0,5...1 мм. В случае лазерной наплавки на узкую подложку больших объемов металла (рис. 2) требуется значительное количество слоев, что повышает опасность образования тре-

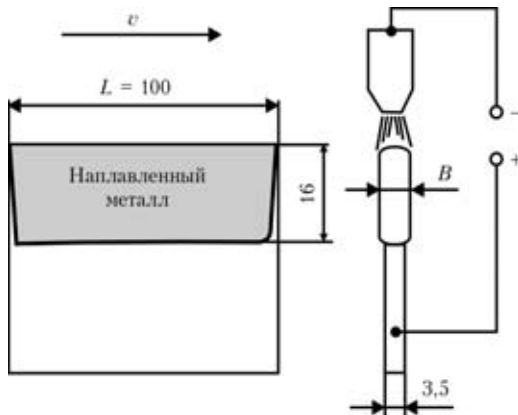


Рис. 3. Схема разделки дефектного участка и многослойной наплавки лопатки соплового аппарата

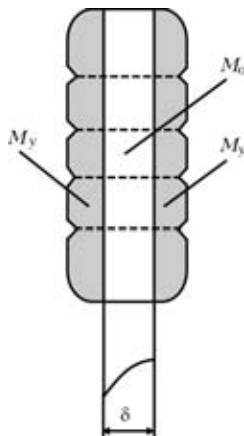


Рис. 4. Схема валика, наплавленного на узкую подложку многослойной наплавкой:  $M_0$  — зона чистового размера восстановленной поверхности;  $M_y$  — зона боковых усилений наплавленного валика

щин в результате повторных нагревов. Поэтому для сильно поврежденных кромок лопаток из жаропрочных никелевых сплавов предпочтительно применение малоамперной АДН или МПН.

Целью данной работы является сравнительная оценка технологических характеристик многослойной наплавки на узкую подложку для малоамперного аргонодугового и микроплазменного процессов применительно к жаропрочным никелевым сплавам с ограниченной свариваемостью. Рассматриваются энергетические характеристики дуги (ток, электрическая мощность, скорость наплавки); тепловые (эффективная мощность нагрева изделия; эффективный КПД нагрева изделия); производительность при наплавке заданного объема металла; расход газа и оценка потерь присадочного металла при наплавке.

Технологические характеристики малоамперного аргонодугового и микроплазменного процесса оценивали на модельной многослойной наплавке на узкую подложку при разработке технологии восстановления соплового аппарата вертолетного двигателя IV ступени из аустенитной стали. Высокая степень износа (рис. 2) потребовала нанесения значительного объема присадочного металла. При наплавке использовали как прутки из проволоки диаметром 2 мм, длиной 50 см, так и порошок фракцией 53...153 мкм из жаропрочного присадочного материала типа IN 625. Наплавку на узкую подложку выполняли в условиях свободного формирования валика (рис. 3, 4). Для обеспечения бокового припуска на механическую обработку наплаваемый валик формировался с подложкой с углом контакта валика более  $90^\circ$  (рис. 3, 4) [8]. Наплавку выполняли на сварочном токе 30...40 А, а затем проводили послойную зачистку каждого слоя наплавленного металла.

Для МПН и АДН использовали установку УП-НС-304М. Расход аргона (1 сорт по ГОСТ 10157-79) составлял 10 и 18 л/мин соответственно для АДН и МПН. Массу наплавленного металла оценивали взвешиванием на весах с точностью до 1 г, непосредственные потери присадочных материалов в процессе наплавки — взвешиванием порошка и проволоки на весах с точностью до 0,1 г.

Технологические характеристики двух процессов малоамперной наплавки для условий наращивания поврежденного участка лопатки объемом  $5,6 \text{ см}^3$ <sup>1)</sup> следующие: сила тока  $I$  для АДН (МПН) соответственно 37 (32) А; скорость  $v$  при наплавке одного слоя соответственно 1,08 (0,667) м/ч; количество слоев  $N$  для наплавки заданного объема металла 9 (4) шт.; время  $t$ , затраченное непосредственно на наплавку заданного

<sup>1)</sup> Здесь и далее в статье требуемый объем после окончательной механической обработки прямоугольного сечения  $3,5 \times 16 \text{ мм}$ .

объема металла при восстановлении лопатки 0,833 (0,583) ч; коэффициент наплавки  $\alpha_n$  соответственно 2,6 (4,82) г/(А·ч).

Производительность наплавки оценивали по количеству слоев наплавленного металла, времени, затраченному непосредственно на наплавку лопатки  $t$ , и значению коэффициента наплавки  $\alpha_n$  [9]:

$$\alpha_n = M_n / (It), \quad (1)$$

где  $M_n$  — фактическая масса наплавленного металла с учетом боковых усилений валика.

Установлено, что значение сварочного тока при МПН на узкую подложку по сравнению с АДН меньше на 15 %, скорость примерно на 40 %; количество слоев меньше практически в 2 раза; на 30 % меньше время наплавки лопатки. По результатам контрольных взвешиваний соплового аппарата до и после наплавки лопаток установлено, что коэффициент наплавки при МПН практически в 1,85 раза больше, чем для АДН.

Непосредственные потери присадочного материала при многослойной наплавке на узкую подложку оценивали по формуле

$$K_{\text{пот } 1} = 1 - M_n / M_{\text{п}}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{п}}$  — масса израсходованного присадочного материала на наплавку лопатки;  $M_n$  — фактическая масса наплавленного металла при наплавке лопатки.

Непосредственные потери проволоки при АДН (рис. 5) состояли примерно из 1 % потерь на угар и 2 % на остаток прутка. Непосредственные потери порошка в процессе МПН оценивали с учетом расхода порошка, массы наплавленного металла и массы порошка, прошедшего через столб дуги и собранного затем вне зоны наплавки. Наблюдение за расходом контрольной порции порошка массой 0,5 кг (рис. 6) позволило установить среднее значение коэффициента использования порошка КИП = 0,625 и значение безвозвратных потерь порошка 5 %. С учетом остатка порошка, не пригодного к наплавке после его трехкратного использования (3,4%), потери присадочного порошка в процессе МПН узкой подложки составляют примерно 10,5% (рис. 5), что аналогично потерям порошка при плазменно-порошковой наплавке [8].

Экспериментальными исследованиями технологических характеристик в целом установлено, что МПН, несмотря на меньшую скорость наплавки слоя, отличается большей производительностью по сравнению с АДН. Для обоснования полученных экспериментальных данных выполнены исследования энергетических и тепловых характеристик свободной и сжатой дуги в диапазоне токов до 50 А.

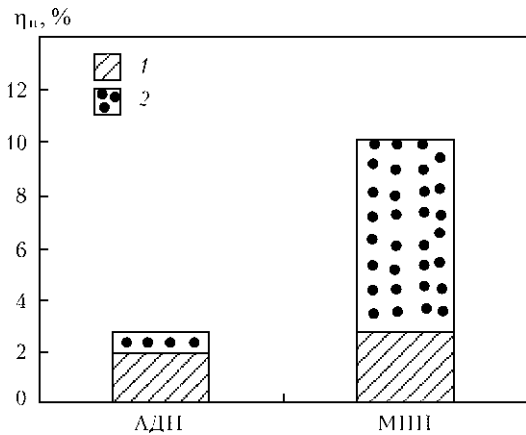


Рис. 5. Непосредственные потери присадочных материалов в процессе наплавки: 1 — остаток; 2 — безвозвратные потери

Тепловые характеристики определяли по методике проточного калориметрирования [8]. В нашем случае ток и напряжение дуги измеряли цифровыми вольтметрами класса 0,5. Постоянный расход воды через проточный калориметр и рубашку охлаждения плазмотрона ППС-04 поддерживали с точностью  $\pm 1,5\%$ . Он обеспечивался путем слива воды из сосуда с постоянным объемом с использованием вентилей точной регулировки воды. Напряжение с термопар измеряли в милливольтгах аналого-цифровым преобразователем ADAM 4118 с точностью  $\pm 0,1\%$ . Калориметрическая система калибровалась по эталонному ртутному термометру ТЛ-4 (ГОСТ 215–73) с ценой деления 0,1 °С. В ходе экспериментов определяли эффективную мощность нагрева изделия  $q_n$  и эффективный КПД нагрева изделия  $\eta_n$  [10]

$$\eta_n = q_n / (UI). \quad (3)$$

Общая мощность потерь тепла  $\sum q_p$  в плазмотроне (горелке) и в дуге составляла

$$\sum q_p = (1 - \eta_n) UI. \quad (4)$$

Максимальная ошибка экспериментальных данных эффективной мощности нагрева изделия с учетом температурных колебаний калориметрической системы составляла не более 3 %. Адекватность измерений подтверждена сходимостью энергетического баланса при МПН (рис. 7).

На рис. 8, 9 для условий горения сжатой и свободной дуги, которые соответствовали рассмотренным режимам наплавки лопатки соплового аппарата, приведены зависимости мощности дуги  $UI$ , эффективной мощности нагрева изделия  $q_n$ , общей мощности тепловых потерь  $\sum q_p$  от тока дуги при постоянных длине дуги и расходах аргона. Энергетические и тепловые характеристики

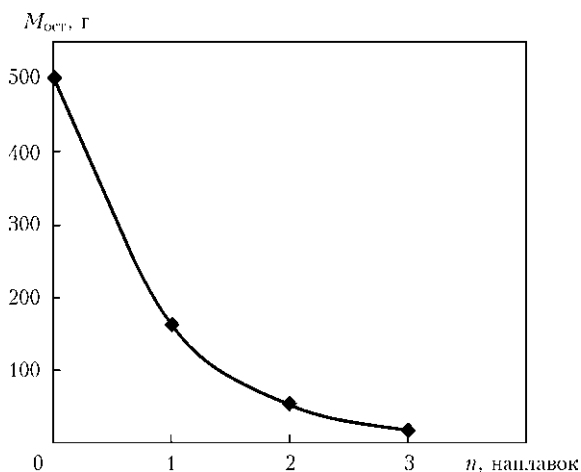


Рис. 6. Зависимость изменения массы контрольной порции порошка  $M_{ост}$  в процессе повторного использования при МПН перед наплавкой ( $n = 0$ ) и после первой–третьей наплавки (1–3)

для рабочих токов при многослойной наплавке на узкую подложку шириной 3,5 мм, рассчитанные по результатам регрессий экспериментальных данных рис. 8, 9, представлены в таблице. Установлено, что при многослойной наплавке на узкую подложку большая производительность МПН по сравнению с АДН обусловлена более высокими значениями мощности дуги (в 2,1 раза) и эффективной мощностью нагрева изделия (в 1,62 раза).

Рассмотрим особенности формирования валика на узкой подложке в зависимости от вида присадочного материала. Геометрические характеристики поперечного сечения валика первого слоя наплавки на узкую подложку соответственно для МПН и АДН следующие:  $B = 7,6$  (6,0) мм;  $h_{o1} = 1,5$  (1,0) мм;  $h_{н1} = 4,4$  (2,0) мм (рис. 10). Экспериментально показано, что при послойной МПН узкой подложки в условиях свободного формирования валика высота наплавленного слоя может достигать более 4 мм. Это в 2 раза больше, чем при АДН, где при значительно меньшем соотношении  $q_{и}/\nu$  (таблица) высота ограничена из-за опасности стекания жидкого металла сварочной ванны по боковым стенкам узкой подложки.

Для обоснования экспериментальных данных с точки зрения гидродинамики движущаяся сварочная ванна на узкой подложке может быть представлена как участок тонкого слоя вязкой жидкости, текущего по торцу пластины [11]. Характер

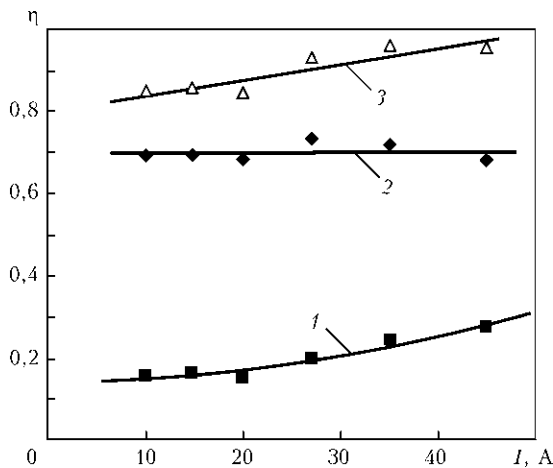


Рис. 7. Энергетический баланс сжатой дуги при МПН: 1 — доля тепловых потерь на охлаждение плазматрона  $\eta_{п}$ ; 2 —  $\eta_{и}$ ; 3 —  $\eta_{п} + \eta_{и}$  (удельный расход аргона:  $q_{пл} = 1$  л/мин;  $q_{тр} = 7,5$  л/мин; расстояние от плазматрона до изделия 5 мм)

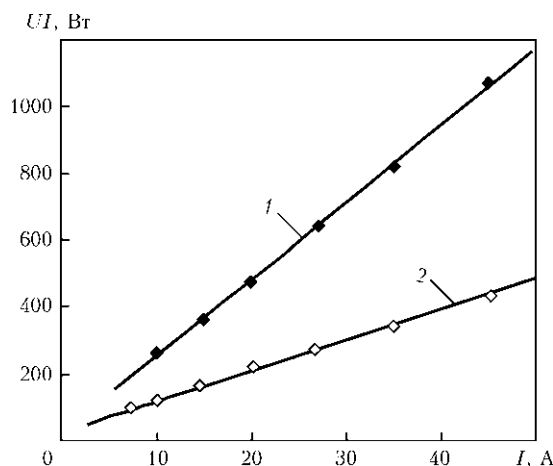


Рис. 8. Энергетические характеристики: 1 — сжатая дуга,  $q_{пл} = 1$  л/мин,  $q_{тр} = 7,5$  л/мин; расстояние от плазматрона до изделия 5 мм; 2 — свободная,  $q_{г} = 10$  л/мин; расстояние от электрода до изделия 2 мм

течения жидкости (ламинарный, турбулентный) определяется критерием кинематического подобия — числом Рейнольдса [12]:

$$Re = 4Q/\nu, \quad (5)$$

где  $Q$  — расход жидкости на единицу ширины потока;  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости, определяемая по времени вытекания заданного объема жидкости через калиброванное отверстие под действием силы тяжести [13].

**Энергетические и тепловые характеристики для свободной и сжатой дуги при многослойной наплавке узкой подложки шириной 3,5 мм**

Тип дуги	I, A	UI, Вт	$\nu$ , мм/с	UI/ $\nu$ , Дж/мм	$q_{и}$ , Вт	$\eta_{и}$	$q_{и}/\nu$ , Дж/мм
Свободная	37	364,34	0,316	1152,96	328,83	0,902	1040,6
	32*	320,23*	—	—	288,21*	0,902	—
Сжатая	32	760,63	0,185	4111,51	532,74	0,700	2879,68

\* Данные приведены для качественного сравнения.

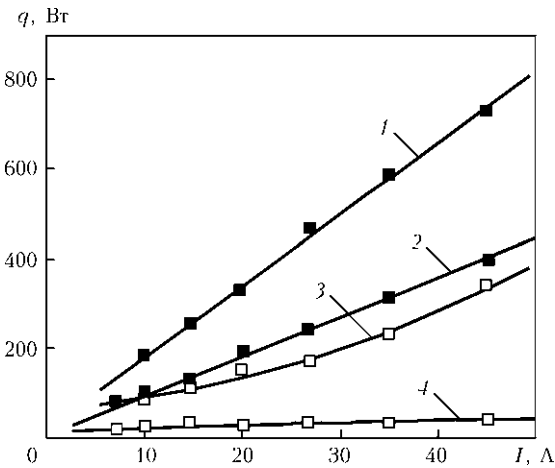


Рис. 9. Тепловые характеристики дуги: 1, 2 — мощность нагрева  $q_n$  соответственно сжатой и свободной дуги; 3, 4 — мощность тепловых потерь  $\sum q_p$  соответственно сжатой и свободной дуги при разном удельном расходе аргона: 1 —  $q_{пл} = 1$  л/мин;  $q_{тр} = 7$  л/мин; 2 —  $q_r = 10$  л/мин (длина дуги от плазматрона до изделия 5 мм (1); от электрода до изделия 2 мм (2))

Нормальному формированию валиков соответствует ламинарный характер течения тонкого слоя вязкой жидкости и значение числа Рейнольдса  $5 < Re < 60$ , нестабильному — турбулентный характер и значение числа Рейнольдса  $50 < Re < 200$  [11].

Для случая сварки (наплавки) узкой подложки расход вязкой жидкости на единицу ширины потока может быть представлен как [11]:

$$Q = vF_{пр}/\delta, \quad (6)$$

где  $v$  — скорость сварки (наплавки);  $F_{пр}$  — площадь поперечного сечения валика;  $\delta$  — ширина узкой подложки.

С учетом того, что форма поперечного сечения наплавленного на узкую подложку валика близка к форме эллипса, его площадь можно представить как

$$F_{пр} = 0,25\pi Bh, \quad (7)$$

где  $h = h_o + h_n$ .

Предположим, что максимально возможная высота наплаваемого на узкую подложку валика, когда металл сварочной ванны еще удерживается от стекания по стенкам узкой подложки за счет вязкости, соответствует фиксированному значению числа Рейнольдса в рассматриваемом диапазоне скоростей наплавки. Тогда увеличить максимальное поперечное сечение наплаваемого валика  $F_{пр}$ , которое может еще удержаться на узкой подложке, при прочих одинаковых условиях возможно также путем изменения вязкости металла сварочной ванны.

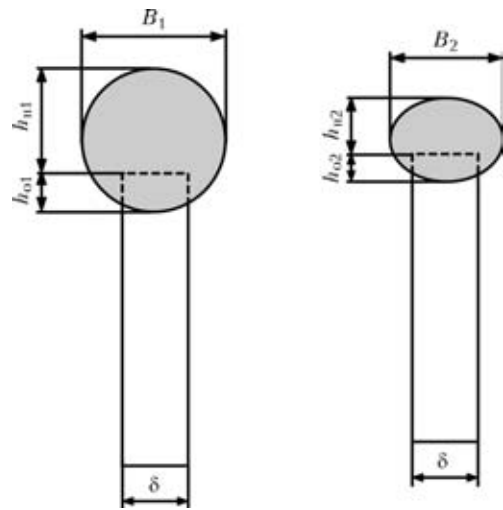


Рис. 10. Схема измерения высоты  $h$  и ширины  $B$  однослойного валика, наплавленного на узкую подложку:  $h_{n1}, h_{o1}, B_1$  — соответственно высота наплавленного слоя, глубина проплавления основного металла и ширина валика при МПН;  $h_{n2}, h_{o2}, B_2$  — то же при АДН

Согласно данным работы [8] порошок с диаметром частиц 53...153 мкм в рассматриваемой области режимов, пролетая через столб дуги, попадает в сварочную ванну в твердом состоянии, что понижает ее среднюю температуру [8]. За счет тепла сварочной ванны относительно холодные частицы порошка в ней при плавлении образуют переохлажденные микрообъемы — очаги «замораживания», которые являются центрами кристаллизации [14]. В этом случае сварочная ванна представляет собой совокупность изменяющихся объемов жидкого и твердожидкого состояния металла, что повышает сопротивление относительно перемещению одной части металла сварочной ванны относительно другой.

Таким образом, с точки зрения гидродинамики сварочной ванны в рамках рассматриваемой физической модели правомерно считать, что с вводом дисперсного материала изменяется кинематическая вязкость жидкого металла  $\nu$ , которую можно выразить через зависимости (4)–(6):

$$\nu = 0,25\nu\pi Bh/(Re \delta). \quad (8)$$

Используя экспериментальные данные геометрических характеристик наплавленных валиков (рис. 10), оценим изменение кинематической вязкости жидкого металла сварочной ванны  $\nu$  для МПН ( $\nu_1$ ) по сравнению с АДН для первого слоя наплавки ( $\nu_2$ ):

$$\nu_1/\nu_2 = \nu_1 B_1 h_1 / (\nu_2 B_2 h_2),$$

$$\nu_1/\nu_2 = 0,667 \cdot 7,6 \cdot 6,0 / (1,08 \cdot 6,0 \cdot 3,0) \approx 1,6. \quad (9)$$

Таким образом, установлено, что увеличение вязкости металла сварочной ванны на 60 % за счет введения в нее дисперсного присадочного мате-



риала позволяет увеличить при многослойной наплавке на узкую подложку шириной 3,5 мм погонную эффективную мощность нагрева изделия примерно в 2,75 раза, что приводит к увеличению более чем в 2 раза высоты (толщины) наплавленного слоя и снижению более чем в 2 раза количества слоев наплавленного металла при заданном объеме наплавленного металла.

Применительно к восстановлению сильно поврежденных кромок лопаток из жаропрочных никелевых сплавов с содержанием более 30...50 %  $\gamma'$ -фазы применение МПН позволит значительно снизить вероятность образования трещин в результате повторных нагревов при многослойной наплавке.

1. *Пермиловский И. А., Гейченко В. С., Фрумлин И. И.* Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей // Автомат. сварка. — 1976. — № 5. — С. 54–56.
2. *Аржакин А. Н., Столяров И. И., Туров А. В.* Разработка технологии восстановления рабочих лопаток 8 ступени КВД авиационного двигателя методом автоматической наплавки // Сварщик. — 2003. — № 4. — С. 8–9.
3. *Мартышин Г. В., Трунова В. Б.* Аргодуговая наплавка с импульсной подачей присадочной проволоки при ремонте деталей // Свароч. пр-во. — 1993. — № 10. — С. 16–17.
4. *Краузе С.* Улучшенная технология ремонта: порошковая наплавка лазером // Газотурбинные технологии. — 2003. — № 5. — С. 24–26.

5. *Особенности сварки высоконикелевых дисперсионно-твердеющих жаропрочных сплавов и ремонта изготавливаемых из них изделий* / В. С. Савченко, К. А. Ющенко, Н. И. Саволей и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 10. — С. 31–33.
6. *Исследование свариваемости никелевых суперсплавов и разработка технологии ремонта лопаток газовых турбин* / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Л. В. Червякова и др. // Там же. — 2005. — № 6. — С. 3–6.
7. *Ющенко К. А., Яровицын А. В.* Опыт применения микроплазменной порошковой наплавки // Материали IV Всеукр. наук.-техн. конф. молодых ученых та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології», 23–25 травн. 2007 р. — К.: ІЕЗ ім Є. О. Патона, 2007. — 323 с.
8. *Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А.* Плазменная наплавка. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 292 с.
9. *Теоретические основы сварки* / В. В. Фролов, В. А. Винокуров, В. Н. Волченко и др. / Под ред. В. В. Фролова. — М.: Высш. шк., 1970. — 592 с.
10. *Рыкалин Н. Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
11. *Шнейерсон В. Я.* Формирование сварных швов отбортованных соединений // Автомат. сварка. — 1979. — № 2. — С. 5, 6, 9.
12. *Капица П. Л.* Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости // Журн. электротехн. физики. — 1948. — 18, вып. 1. — С. 3–28.
13. *Френкель Я. И.* Кинетическая теория жидкостей. — Л.: Наука, 1975. — 592 с.
14. *Ивочкин И. И.* Подавление роста столбчатых кристаллов методом «замораживания» сварочной ванны // Свароч. пр-во. — 1965. — № 12. — С. 1–3.

Comparative analysis of technological characteristics of low-amperage argon-arc and microplasma powder welding processes is conducted for a case of multilayer cladding on a narrow substrate 3.5 mm wide. Increase in toughness of the weld pool metal provided by a dispersed additive in multilayer microplasma powder cladding allows increasing the effective heat input and thickness of the deposited layer, as well as reducing the risk of cracking of heat-resistant nickel alloys, which may be caused by re-heating in multilayer cladding.

Поступила в редакцию 02.04.2009

### Технология и оборудование для орбитальной сварки



Одномоторная головка (ОСГ 57-76) для аргодуговой сварки вольфрамовым электродом

Наружный диаметр свариваемых труб, мм..... 57-219  
 Толщина стенок свариваемых труб, мм..... 2,5-7,0  
 Сварочный ток, А..... до 250  
 Скорость сварки, мм/мин.....10-150

Сварка выполняется без разделки кромок и без использования присадочной проволоки.



Инверторный источник питания для ATIG-сварки и блок принудительного охлаждения



Панель оператора



Активирующий флюс

Данная технология и аналог сварочной головки прошли испытания на Курской и Смоленской АЭС