

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ВАЛИКА ПРИ ОДНОСЛОЙНОЙ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКЕ НА КРОМКИ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГТД*

П. Д. ЖЕМАНЮК¹, И. А. ПЕТРИК¹, С. Л. ЧИГИЛЕЙЧИК¹, А. В. ЯРОВИЦЫН², Г. Д. ХРУЩОВ²

¹АО «Мотор Сич». 69068, г. Запорожье, пр. Моторостроителей, 15. E-mail: motor@motorsich.com

²ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Ввиду необходимости увеличения размеров восстанавливаемых наплавкой поврежденных участков кромок лопаток авиационных ГТД из никелевых жаропрочных сплавов на высоту 5...15 мм при микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку менее 3 мм требуется уточнение закономерностей формообразования наплавляемого металла. Для условий соответствующей однослойной наплавки исследован диапазон изменения энергетических показателей процесса в системе «эффективная тепловая мощность дуги–погонная энергия–площадь поперечного сечения наплавленного валика» и оценена действенность технологического управления поперечным сечением наплавляемого слоя. Установлено, что в условиях ограниченной глубины проплавления основного металла площадь поперечного сечения наплавляемого валика наиболее эффективно регулируется за счет изменения погонной энергии в диапазоне 100...1600 Дж/мм. Предполагается, что установленная технологическая взаимосвязь между величиной погонной энергии, высотой и площадью поперечного сечения наплавляемого валика будет способствовать формированию дополнительных критериев предотвращения образования трещин в сварном соединении «основной – наплавленный металл» при восстановлении деталей авиационных двигателей из никелевых жаропрочных сплавов многослойной микроплазменной порошковой наплавкой. Библиогр. 18, табл. 4, рис. 8.

Ключевые слова: микроплазменная порошковая наплавка, никелевый жаропрочный и кобальтовый жаростойкий сплав, узкая подложка, эффективная тепловая мощность дуги, погонная энергия, термический КПД, площадь поперечного сечения наплавленного валика

Одной из областей применения дуговой наплавки на узкую подложку [1] шириной до 3 мм является серийный ремонт поврежденных или изношенных кромок лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [2–8]. Рабочие лопатки серийно ремонтируемых авиационных двигателей Д18Т, Д436, АИ222, АИ-450 изготовлены из никелевых жаропрочных сплавов с поликристаллической структурой (ЖС6У-ВИ, ЖС6К-ВИ) или из сплавов с направленной кристаллизацией (ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ) [9]. Данные высоколегированные материалы, содержащие 55 и более об. % γ' -фазы, предназначены для эксплуатации при температурах 1000...1100 °С и отличаются высокой склонностью к образованию трещин при сварке плавлением и/или при последующей термической обработке [9, 10]. Аргонодуговая сварка применялась для восстановления таких деталей более 40 лет, однако ремонт кромок лопаток был ограничен глубиной до 2 мм, а присадочный металл уступал основному металлу по жаропрочности [2, 3].

Более 10 лет в АО «Мотор Сич» и ГП «Ивченко-Прогресс» для ремонта авиационных рабочих лопаток из данных сплавов с наработкой более

3...5 тыс. ч успешно применяется микроплазменная порошковая наплавка [4–8]. В данном процессе широко используются несколько марок присадочных порошков — в частности никелевый жаропрочный сплав ЖС32 [4–8] и кобальтовый жаростойкий и износостойкий сплав ВЗК [5, 8].

На сегодняшний день серийное ремонтное производство ставит требования к увеличению размеров восстанавливаемых наплавкой поврежденных участков лопаток (торцы бандажных полок, лабиринтных гребешков, Z-образных профилей и пера лопаток) на высоту до 5...15 мм ввиду соответствующего увеличения размеров зон износа, прогаров и термоусталостных трещин, развивающихся в процессе эксплуатации данных деталей. Их реставрацию можно охарактеризовать как процесс многослойной наплавки, в котором сварное соединение «основной-наплавленный металл» может быть в определенных условиях склонным к образованию микро- и макротрещин [6, 10, 11]. В свою очередь многослойную наплавку с некоторым приближением можно представить как совокупность однослойных валиков. Соответственно, актуально расширение представлений о границах диапазона энергетических показателей однослойной наплавки с целью рационального выбора такого уровня и способов дозирования тепловложений в изделие, при которых обеспечивается

* По материалам доклада, представленного на международной конференции «Современные технологии сварки», 13–15 июля 2016 г., г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

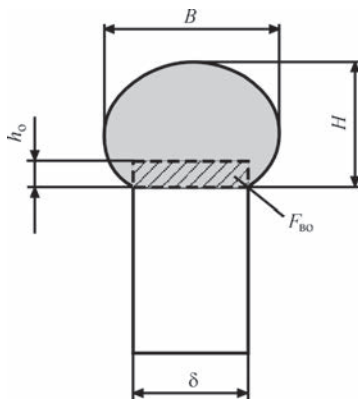


Рис. 1. Схема измерения размеров наплавленного валика: δ — ширина узкой подложки; B — ширина валика; H — высота валика; h_0 , $F_{во}$ — глубина проплавления и площадь поперечного сечения переплавленного основного металла

технологическая прочность данного сварного соединения, т. е. не проявляется склонность выше указанных материалов к образованию трещин при сварке плавлением.

Одной из составляющих данной задачи является выявление закономерностей и дальнейшая оптимизация технологического управления формой валика, наплаваемого на узкую подложку. Помимо рационального выбора объема наплаваемого металла при ручной и автоматической (роботизированной) наплавке это позволит также оптимизировать размеры боковых усилений валика $p = 0,5(B - \delta)$ в его поперечном сечении (рис. 1).

В свою очередь боковые усиления наплавленного валика являются припусками, удаляемыми механической обработкой при формировании заданной геометрии восстановленного наплавкой элемента. Ввиду опасности образования прижогов и шлифовочных трещин абразивную обработку деталей из никелевых жаропрочных сплавов проводят с использованием специальных режимов, оборудования и абразивных кругов [12, 13]. При этом используют пониженные скорости вращения абразивного инструмента (до 25 м/с) и подачи (350...750 мм/мин), ограничивая интенсивность съема обрабатываемого материала [13]. Таким образом, механическая обработка наплавленного металла, помимо технической сложности формообразования соответствующих профильных поверхностей лопатки, является весьма трудоемким процессом, дополнительно требующим привлечения высококвалифицированных специалистов, дорогостоящих оборудования и материалов. Соответственно, уменьшение ширины наплаваемого валика в значительной мере способствует уменьшению трудоемкости и повышению экономической эффективности ремонта лопатки.

Целью данной работы являлась оценка диапазона эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги (предварительно определялась по методике проточного калориметрирования

[1] для соответствующего значения сварочного тока) и погонной энергии для условий однослойной наплавки на узкую подложку шириной $\delta = 0,3...3,0$ мм на режимах, близких к оптимальным, и установление базовых закономерностей технологического управления формой поперечного сечения наплаваемого валика.

В качестве основного металла использовались образцы из стали 12X18H10T размерами 90...100×30...40 мм толщиной 0,3...3,0 мм. Наплавка на режимах, описанных ранее в работе [8], выполнялась в условиях свободного формирования валика на торце пластины, установленной вертикально в тисках. Расстояние от наплаваемой поверхности до медных губок тисков составляло не менее 20 мм, от внешнего среза плазмотрона до образца — 5 мм. В качестве присадки применялись порошки сплавов ЖС32 и В3К фракцией соответственно 63...–160 мкм и 53...–150 мкм, с разной температурой плавления (примерно на 70...90 °С) и жидкотекучестью расплавленного металла сварочной ванны. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовался аргон высшего сорта по ГОСТ 10157–79. Эксперименты проводились на двух типах оборудования, различающихся видом подачи дисперсной присадки, степенью сжатия микроплазменной дуги и скважностью S импульсного сварочного тока:

- установка STARWELD 190H, плазмотрон НРН80 (диаметры каналов сопел: плазменного $d_{пл} = 2$ мм, фокусирующего $d_{ф} = 3$ мм), фирма Kenametal Stellite GmbH – непрерывная подача порошка (расход транспортирующего газа $Q_{тр} = 3$ л/мин), $S \approx 1,5$;

- установка УПНС304M2/M3, плазмотрон ППС04 ($d_{пл} = 2,5$ мм, $d_{ф} = 4,5$ мм) — порционная подача порошка ($Q_{тр} = 2$ л/мин), $S \approx 4,5$.

Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью регрессионных зависимостей величины эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги $q_{и}$ от сварочного тока I , ранее полученных с использованием методики проточного калориметрирования [1]. Погонная энергия $q_{и}/v$ определялась по методике работы [11]:

$$q_{и}/v = Q_{\Sigma}/L, \quad (1)$$

где Q_{Σ} — тепловложения в анод с учетом эффективного КПД нагрева изделия [1, 11]; L — приведенная длина эллиптического цилиндра валика. Площади поперечного сечения наплавленного валика $F_{в}$ и наплавленного металла в нем $F_{вн} = F_{в} - F_{во}$ определялись расчетом по методике работы [14] на основании измерений ширины, высоты валика и глубины проплавления основного металла с точностью до 0,05 мм согласно рис. 1. Термический КПД для наплаваемого металла ЖС32 опреде-

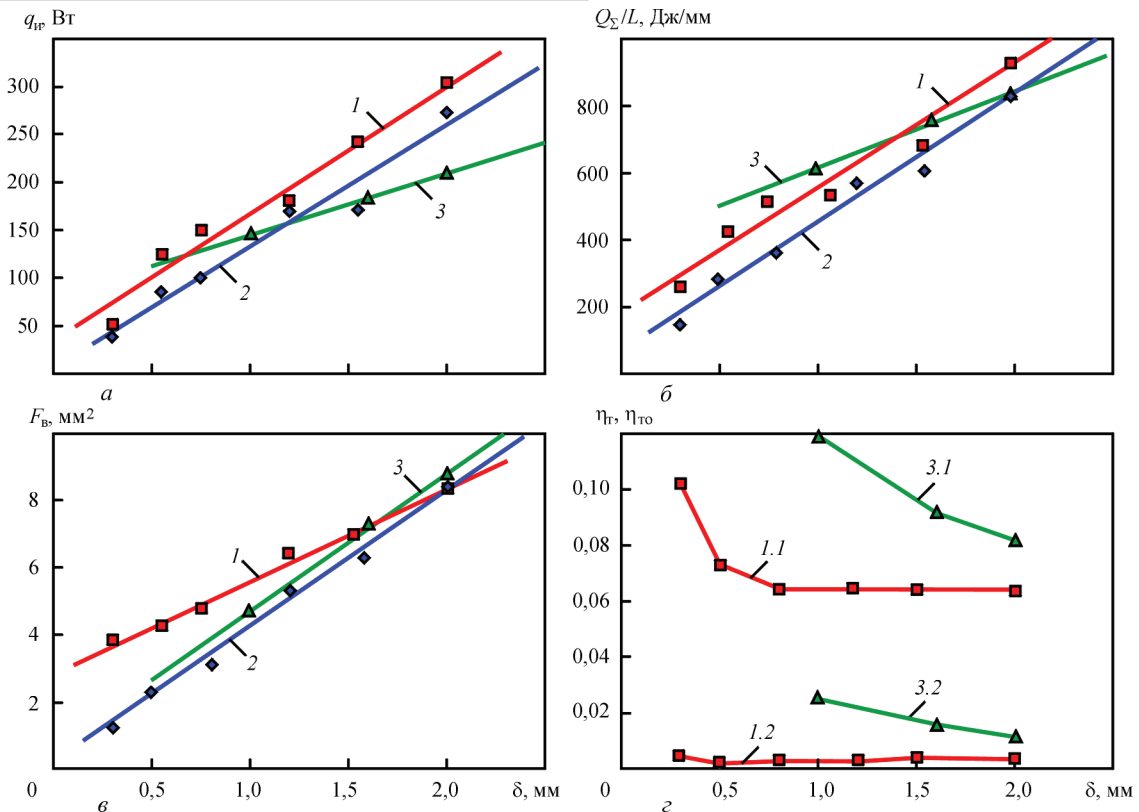


Рис. 2. Влияние ширины узкой подложки δ на эффективную тепловую мощность микроплазменной дуги $q_{\text{и}}$ (а), погонную энергию Q_{Σ}/L (б), площадь поперечного сечения наплавленного валика $F_{\text{в}}$ (г) и термический КПД $\eta_{\text{т}}$ (з): 1 — наплавка сплава ЖС32, установка Starweld 190Н, непрерывная подача порошка, защитный газ Ar; 1.1 — полный термический КПД процесса $\eta_{\text{т}}$; 1.2 — составляющая термического КПД, расходуемая на плавление основного металла; 2 — наплавка сплава ВЗК, установка Starweld 190Н, постоянная подача порошка, защитный газ Ar; 3 — наплавка сплава ЖС32, установка УПНС-304М2/М3, порционная подача порошка, защитный газ 95 % Ar + 5 % H₂; 3.1 — полный термический КПД процесса $\eta_{\text{т}}$; 3.2 — составляющая термического КПД, расходуемая на плавление основного металла

лялся расчетным путем [11] исходя из площади его поперечного сечения $F_{\text{вн}}$:

$$\eta_{\text{тн}} = \frac{M_{\text{н}} H_{\text{м}}}{q_{\text{и}}}, \quad (2)$$

где $H_{\text{м}} = 861,2$ и $1312,6$ Дж — удельная энтальпия 1 г соответственно наплавленного металла ЖС32 и основного металла 12Х18Н10Т.

Первоначально были оценены закономерности изменения энергетических показателей процесса микроплазменной порошковой наплавки и показателей формы валика для узкой подложки $\delta = 0,3 \dots 2,0$ мм (рис. 2 и табл. 1). Установлено, что эффективная тепловая мощность микроплазменной дуги изменяется в диапазоне 30...330 Вт, погонная энергия процесса 100...1000 Дж/мм, производительность наплавки 0,3...1,3 г/мин; площадь поперечного сечения валика 1...9 мм². Зависимости $q_{\text{и}}(\delta)$, $Q_{\Sigma}/L(\delta)$ и $F_{\text{в}}(\delta)$ близки к линейной. Полученные результаты свидетельствуют об определенном влиянии на энергетические показатели процесса химического состава присадки (ЖС32, ВЗК) и способ подачи дисперсной присадки (непрерывный, порционный), что позволяет расширить представления об известных способах тех-

нологического регулирования тепловложений в изделие (сварочный ток, степень сжатия плазменной дуги, рациональный выбор состава защитного газа [1, 4]). Указанные технологические факторы в диапазоне $q_{\text{и}} < 150$ Вт и $\delta < 1,2$ мм также оказывают заметное влияние на уменьшение поперечного сечения наплаваемого валика. Полный термический КПД процесса наплавки на узкую подложку $\delta = 0,3 \dots 2,0$ мм, как правило, не превышает $\eta_{\text{т}} = 6 \dots 10$ %, причем часть эффективной мощности $q_{\text{и}}$, расходуемая на плавление основного металла, составляет $\eta_{\text{то}} = 0,16 \dots 2,5$ %. Доля основного металла в наплавленном ограничена в диапазоне 5...15 %, что соотносится с оптимальными режимами плазменно-порошковой наплавки [1].

Установленный диапазон значений коэффициента формы валика В/Н в пределах 0,77...1,22 (см. табл. 1) позволил уточнить технологически вероятные схемы формообразования наплаваемого валика [14] при варьировании ряда технологических факторов микроплазменной порошковой наплавки: ширины узкой подложки; эффективной тепловой мощности дуги и производительности. Для $\delta = 0,3 \dots 2,0$ мм в зависимости от вязкости расплавленного металла сварочной ванны (т. е. наплаваемого металла, так как $\gamma_{\text{о}} \rightarrow \text{min}$) характер-

Таблица 1. Влияние ширины узкой подложки δ на долю основного металла γ_o , производительность наплавки M_H и коэффициент формы валика B/H при микроплазменной порошковой наплавке сплавов ЖС32 и ВЗК

δ , мм	γ_o , %			B/H			M_H , г/мин		
	ЖС32 (н)	ЖС32 (п)	ВЗК (н)	ЖС32 (н)	ЖС32 (п)	ВЗК (н)	ЖС32 (н)	ЖС32 (п)	ВЗК (н)
0,3	9,97	—	9,26	0,787	—	1,054	0,351	—	0,157
0,55	5,11	—	5,04	0,772	—	1,041	0,645	—	0,333
0,75	8,98	—	8,5	0,857	—	0,930	0,639	—	0,366
1,0	—	14,16	—	—	1,201	—	—	1,043	—
1,2	11,46	—	13,55	0,933	—	0,936	0,826	—	0,534
1,55	12,11	13,37	15,39	1,216	1,113	1,000	1,013	0,872	0,711
2,0	11,19	10,64	10,31	1,032	1,206	0,969	1,276	0,958	1,261

Примечание: (н) и (п) – соответственно непрерывная и порционная подача порошка.

ны следующие изменения формы поперечного сечения наплавленных валиков:

– при повышенной вязкости (сплав ЖС32) — по закону увеличивающегося эллипса с $H > B$ при $\delta < 0,8$ мм и $B > H$ при $\delta > 1,5$ мм;

– при повышенной жидкотекучести (сплав ВЗК) — по закону увеличивающегося круга с $H \approx B$.

Рассмотренные выше способы технологического влияния на форму и размеры наплаваемого на узкую подложку валика следует отнести к пассивным, так как они могут быть выбраны лишь до начала наплавки. Известно [1, 4], что технологическим параметром сжатой дуги, в первую очередь определяющим ее эффективную тепловую мощность, является сварочный ток. Соответственно, она достаточно легко может технологически управляться в процессе восстановительной наплавки, в частности — при изменении ширины узкой подложки при локальном ремонте лопаток сложной геометрии [4–8]. Поэтому в данной работе также оценивалась возможность управления формой валика за счет применения импульсного сварочного тока с различной скважностью S .

Исследования проводились параллельно для дисперсных присадочных материалов ВЗК (установка STARWELD 190Н, $S \approx 1,5$) и ЖС32 (установка УПНС304М2/М3, $S \approx 4,5$). Дополнительно, кроме наплавки постоянным сварочным током (режим 1), рассматривалось 2 типа импульсных режимов:

режим 2: $I_{имп} < I_{б}, I_{п} < I_{б};$

режим 3: $I_{имп} > I_{б}, I_{п} < I_{б};$

где $I_{б}$ — базовое значение величины постоянного сварочного тока; $I_{имп}, I_{п}$ — соответственно значения сварочного тока при импульсе и паузе.

Закономерности изменения энергетических показателей процесса микроплазменной порошковой наплавки и формы валика для узкой подложки $\delta = 0,3 \dots 2,0$ мм представлены на рис. 3, табл. 2 и рис. 4, табл. 3 для условий наплавки сплавов ВЗК и ЖС32, соответственно. В зависимости от величины скважности импульса сварочного тока при наплавке на узкую подложку $\delta \leq 2$ мм на режиме 3 отмечено различное положение зависимостей

$q_H(\delta), Q_{\Sigma}/L(\delta)$ и $F_B(\delta)$ относительно аналогичных при наплавке на постоянном токе (см. рис. 3, 4).

Полученные результаты свидетельствуют о возможности эффективного управления размерами поперечного сечения валика, наплаваемого

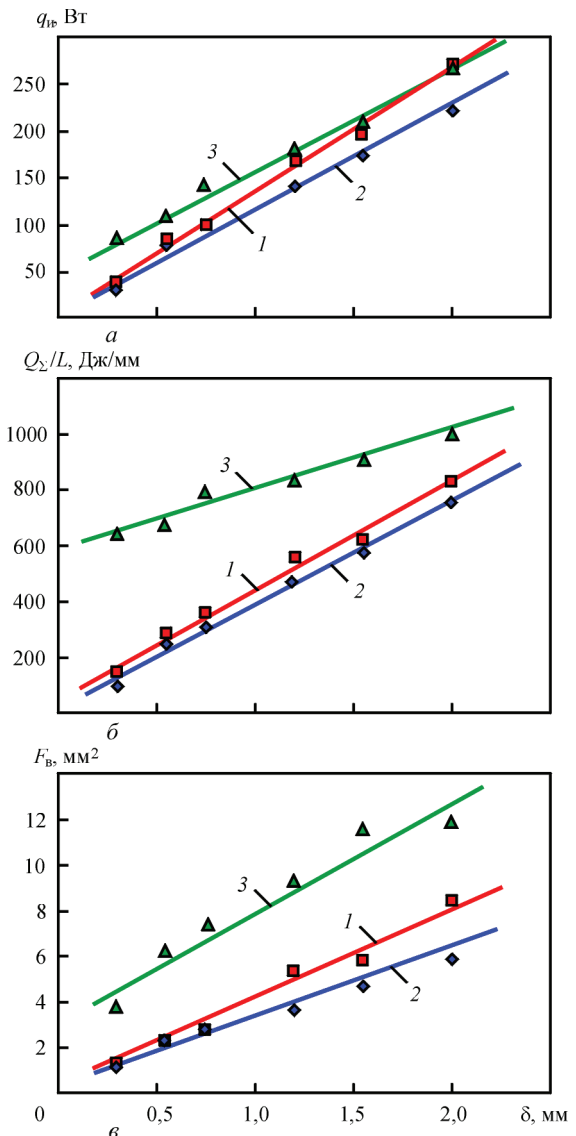


Рис. 3. Влияние ширины узкой подложки δ на эффективную тепловую мощность микроплазменной дуги q_H (а), погонную энергию Q_{Σ}/L (б), площадь поперечного сечения наплавленного валика F_B (в). Наплавка сплава ВЗК, защитный газ Ar, установка Starweld 190Н, непрерывная подача порошка: 1 — постоянный; 2, 3 — импульсный сварочный ток

Таблица 2. Влияние ширины узкой подложки δ на долю основного металла γ_o , производительность наплавки M_n и коэффициент формы валика B/H при микроплазменной порошковой наплавке сплава ВЗК на постоянном (режим 1) и импульсном токе (режим 2, 3)

δ , мм	γ_o , %			M_n , г/мин			B/H		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 1	Режим 2	Режим 3
0,3	9,26	7,47	4,73	0,157	0,116	0,251	1,05	0,71	0,72
0,55	5,04	7,31	1,67	0,333	0,287	0,332	1,04	0,90	0,85
0,75	8,50	13,37	4,64	0,366	0,329	0,456	0,93	1,06	0,74
1,2	13,55	14,12	8,20	0,534	0,485	0,785	0,94	0,92	0,83
1,55	15,39	8,47	6,48	0,711	0,616	1,042	1,00	0,92	0,79
2,0	10,31	11,32	6,74	1,260	0,678	1,496	0,97	1,16	0,80

на узкую подложку, за счет рационального выбора параметров импульсного сварочного тока. Также при наплавке на импульсном сварочном токе сплава ВЗК несколько уменьшается (на 2...5 %) доля основного металла по сравнению с наплавкой на постоянном токе (см. табл. 2) и становится возможным формирование наплавляемого валика по закону увеличивающегося эллипса с $H > B$ для всего диапазона ширины узкой подложки $\delta = 0,3...2,0$ мм. При наплавке на импульсном токе сплава ЖС32 возможности уменьшения доли основного металла и управления коэффициентом формы валика за счет применения импульсных режимов несколько ограничены (см. табл. 3).

Исследования влияния скорости микроплазменной порошковой наплавки сплавов ЖС32 и ВЗК на энергетические показатели процесса и площадь поперечного сечения валика выполнялись в режиме автоматической наплавки постоянным сварочным током на роботизированной установке 190НР. Установлено (рис. 5), что при увеличении скорости наплавки на узкую подложку шириной $\delta = 0,3...3,0$ мм с 1,2 до 3,6 м/ч площадь поперечного сечения наплавленного валика F_B снижается в среднем в 3 раза, а погонные тепловложения в изделие Q_{Σ}/L – в 4 раза. Производительность наплавки на узкую подложку $\delta = 3,0$ мм в рассматриваемом диапазоне скоростей по данным рис. 5 составляет примерно 3 г/мин

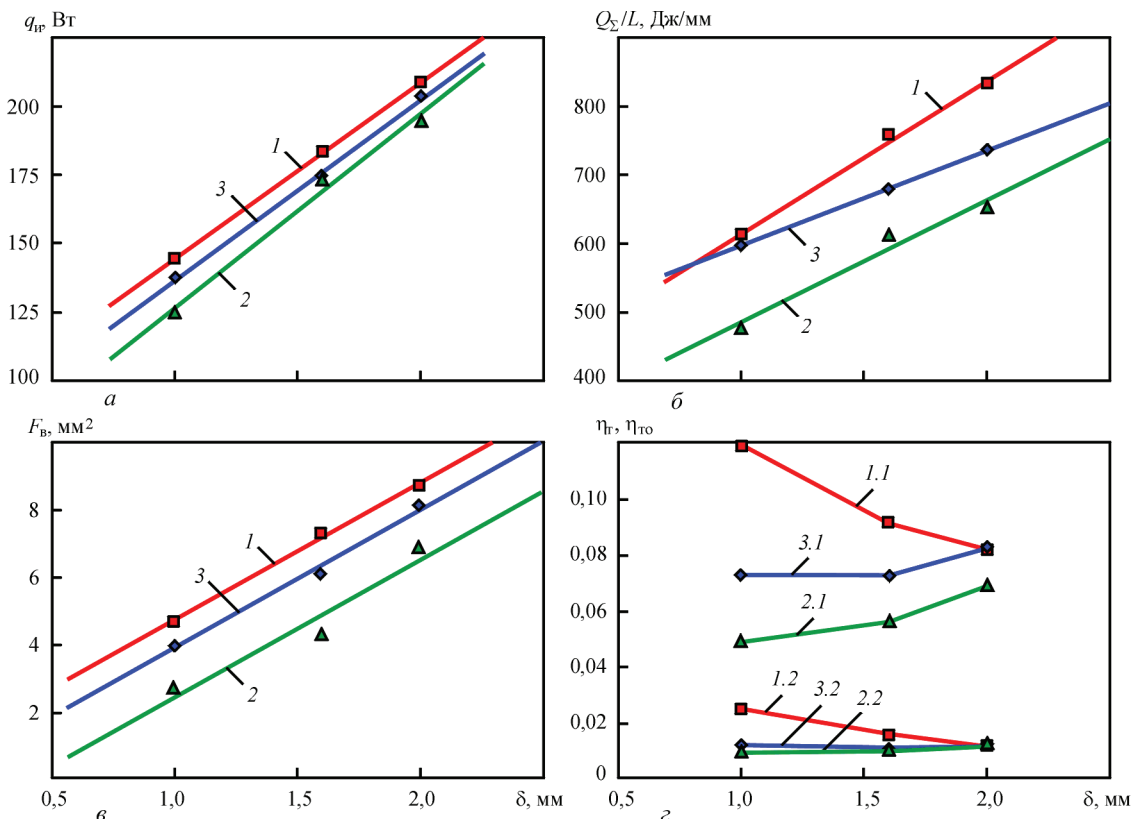


Рис. 4. Влияние ширины узкой подложки δ на эффективную тепловую мощность микроплазменной дуги q_n (а), погонную энергию Q_{Σ}/L (б), площадь поперечного сечения наплавленного валика F_B (в) и термический КПД η_T (г) при изменении ширины узкой подложки δ . Наплавка сплава ЖС32, защитный газ 95 % Ar + 5 % H₂, установка УПНС-304М2/М3, порционная подача порошка: 1 — постоянный сварочный ток; 2, 3 — импульсный сварочный ток (режимы 2 и 3); 1.1, 2.1, 3.1 — полный термический КПД процесса η_T ; 1.2, 2.2, 3.2 — составляющая термического КПД $\eta_{то}$, расходуемая на плавление основного металла

Таблица 3. Влияние ширины узкой подложки δ на долю основного металла γ_o , производительность наплавки M_H и коэффициент формы валика B/H при микроплазменной порошковой наплавке сплава ЖС32 на постоянном (режим 1) и импульсном токе (режим 2, 3)

δ , мм	γ_o , %			M_H , г/мин			B/H		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 1	Режим 2	Режим 3
1,0	17,17	15,09	11,57	0,950	0,344	0,585	1,04	0,89	0,79
1,55	12,61	15,9	13,64	0,970	0,557	0,750	1,11	1,07	1,22
2,0	10,63	13,7	11,08	1,020	0,773	1,004	1,21	1,11	1,07

и приближается к производительности подачи порошка.

Дополнительно показано (см. табл. 4), что применение дисперсной присадки при микроплазменной наплавке является более предпочтительным

по сравнению с присадкой из микропроволоки, так как позволяет снизить эффективную тепловую мощность дуги более чем в 2 раза, погонную энергию — в 1,8 раза, а производительность наплавки повысить в 1,8 раза. Также, исходя из данных работы [15], снижение погонных тепловложений до уровня лазерно-порошковой наплавки при микроплазменной порошковой наплавке возможно с увеличением ее скорости примерно до 22,6 м/ч.

Оценка совместного и отдельного влияния технологических факторов эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги и погонной энергии на форму поперечного сечения валика выполнялась путем анализа целевых функций [18] ϵ_{q_n} , $\epsilon_{Q_\Sigma/L}$ и ϵ_F в виде отношения величин эф-

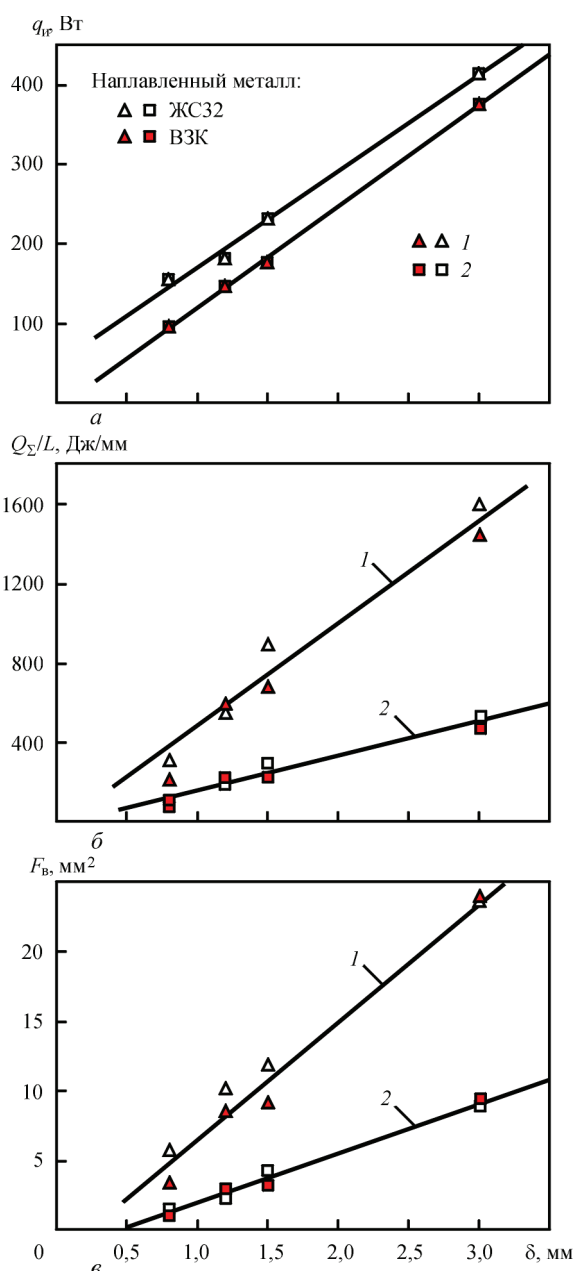


Рис. 5. Влияние ширины узкой подложки δ и средней скорости наплавки на эффективную тепловую мощность микроплазменной дуги q_n (а), погонную энергию Q_Σ/L (б), площадь поперечного сечения наплавленного валика F_B (в): 1 — 1,2; 2 — 3,6 м/ч. Роботизированная установка Starweld 190Н, постоянная подача порошка, защитный газ Ar

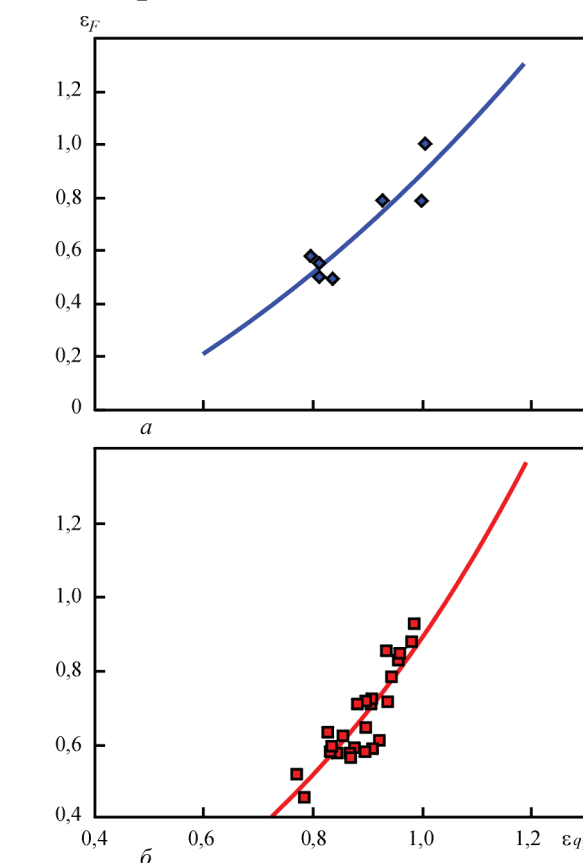


Рис. 6. Зависимость относительной площади поперечного сечения наплавленного валика ϵ_F от относительной эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги ϵ_{q_n} при микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку: а — сплав ВЗК, установка Starweld 190Н, непрерывная подача порошка, защитный газ Ar, $\delta = 0,3...3,0$ мм; б — установка УПНС-304М2/М3, порционная подача порошка, защитный газ 95 % Ar + 5 % H₂, $\delta = 1,0...2,0$ мм

Таблица 4. Сравнение характеристик поперечного сечения валика (B, H, γ_0), эффективной мощности нагрева изделия q_n , погонной энергии Q_{Σ}/L и производительности наплавки M_n при микроплазменной и лазерной наплавке

Процесс наплавки	Наплавляемый материал	B , мм	H , мм	q_n , Вт	γ_0 , %	Q_{Σ}/L , Дж/мм	M_n , г/мин	Источник
Микроплазменная, $\approx 22,6$ м/ч	Порошок H13 tool steel	2,0	0,2	$\approx 280^{*1}$	---	$\approx 45^{*1}$	1,0	[15] ^{*3}
Микроплазменная, $\approx 3,6$ м/ч	Проволока AISI P20 $\varnothing 0,3$ мм	$1,9 \pm 0,06$	$0,9 \pm 0,04$	400	$5,12 \pm 0,12$	380,95	0,47	[16] ^{*3}
	Порошок ВЗК, 53...–160 мкм	2,0	1,8	150	≈ 15	211,7	0,87	Данная работа ^{*2}
Yb:YAG Laser ≈ 24 м/ч	Порошок Ti–6Al–4V	$1,9...2,1$	$0,15...0,22$	400	---	48	1,00	[17] ^{*3}

Примечания: ^{*1} – оценка авторов статьи по данным параметров режимов [15]; ^{*2} – однослойная наплавка на узкую подложку $\delta = 1,2$ мм; ^{*3} – многослойная наплавка.

эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги, погонной энергии и площадей поперечного сечения наплавленного валика при текущем режиме наплавки и базовом, соответственно. Базовым режимом, как правило, являлся режим наплавки на постоянном сварочном токе. Значения целевой функции ϵ_F оценивали при варьирующихся технологических факторах в виде различных режимов импульсного сварочного тока ($I_{имп} < I_6, I_n < I_6$ и $I_{имп} > I_6, I_n < I_6$) и скорости наплавки, которые учитывались через показатели эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги и погонной энергии. Регрессионные зависимости изменения целевых функций $\epsilon_F = f(\epsilon_{q_n})$ и $\epsilon_F = f(\epsilon_{q_n}, \epsilon_{Q_{\Sigma}/L})$ относительно их базового уровня ($\epsilon_{q_n} = 1; \epsilon_{Q_{\Sigma}/L} = 1; \epsilon_F = 1$) представлены в виде двухмерного и трехмерного (контурного) графиков на рис. 6, 7.

Установлено, что снижение эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги на 20 % вызывает уменьшение площади поперечного сечения наплавленного валика на 30...50 % соответственно для сплавов ВЗК и ЖС32. При этом для импульсного сварочного тока соотношения ширины B к высоте наплавленного валика H , как правило, находится в пределах 0,7...0,92.

Изменение погонной энергии наплавки (преимущественно за счет ее скорости), особенно в со-

четании с некоторым увеличением эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги, более существенно влияет на форму валика, наплавляемого на узкую подложку (см. рис. 6, 7). При наплавке с непрерывной подачей порошка увеличение погонной энергии в 2...3 раза позволяет на столько же увеличить площадь поперечного сечения валика, а в сочетании с одновременным увеличением эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги на 70 % — до 3,6 раз (см. рис. 7, а). При наплавке с порционной подачей порошка увеличение погонной энергии в 2,5 раза позволяет увеличить площадь поперечного сечения наплавленного валика до 3,5 раз, а в сочетании с одновременным увеличением эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги на 10...30 % — до 5,5...6 раз (см. рис. 7, б). Одновременное снижение эффективной мощности микроплазменной дуги и погонной энергии на 20...30 % относительно базового уровня значений $\epsilon_{q_n}, \epsilon_{Q_{\Sigma}/L}$ позволяет уменьшить площадь поперечного сечения валика в 1,5...2,0 раза (см. рис. 7).

Проведенный анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 2–7, позволил выделить 3 базовых закона изменения поперечного сечения валика, наплавленного на узкую подложку шириной $\delta = 0,5...3,0$ мм. Первый из них обусловлен изменением ширины узкой подложки (рис. 8, а)

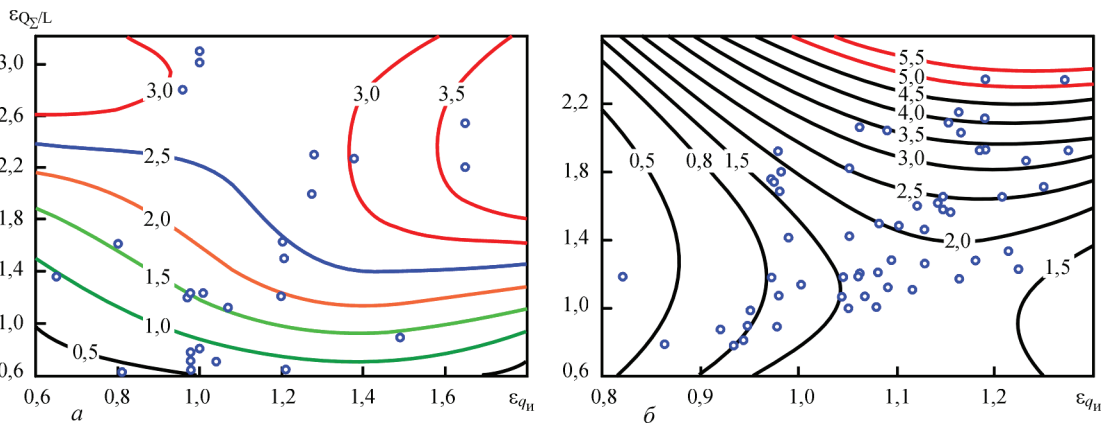


Рис. 7. Контурный график изменения относительной площади поперечного сечения наплавленного валика ϵ_F от относительной эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги ϵ_{q_n} и относительной погонной энергии микроплазменной наплавки $\epsilon_{Q_{\Sigma}/L}$: а — сплава ВЗК, установка Starweld 190Н, непрерывная подача порошка, защитный газ Ar, $\delta = 0,3...3,0$ мм; б — установка УПНС-304М2/М3, порционная подача порошка, защитный газ 95 % Ar + 5 % H₂, $\delta = 1,0...2,0$ мм

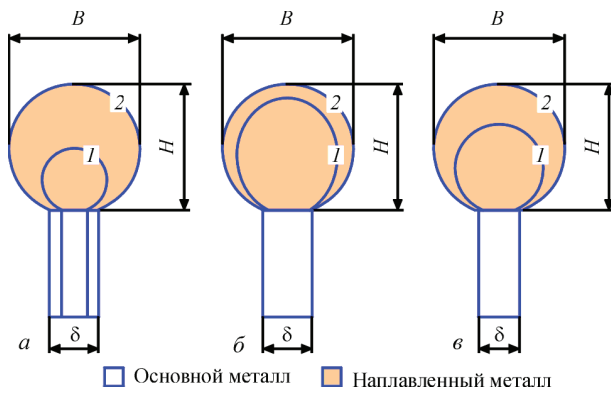


Рис. 8. Базовые закономерности изменения формы поперечного сечения валика при наплавке на узкую подложку в зависимости от: ширины узкой подложки (а), изменяющейся эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги (б), изменяющейся погонной энергии (в); 1→2 — направление изменения сечения валика

при постоянной скорости наплавки: при ее расширении в 6 раз необходимая для наплавки эффективная тепловая мощность микроплазменной дуги увеличивается в 4...8 раз, что сопровождается увеличением площади поперечного сечения валика в 8...12 раз. Второй обусловлен изменением эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги на ±20 % при постоянной ширине узкой подложки и скорости наплавки (рис. 8, б), что сопровождается изменением площади поперечного сечения валика в 1,3...2,0 раза. Третий обусловлен изменением в 3...4 раза погонной энергии наплавки за счет ее скорости при постоянных ширине узкой подложки и эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги (рис. 8, в), что сопровождается соответствующим изменением площади поперечного сечения валика в 3...4 раза. Данные законы изменения поперечного сечения валика, как правило, на практике одновременно сочетаются в той или иной степени.

Ранее для аргонодуговой сварки считалось [2, 3, 10], что технологическая прочность при сварке никелевых жаропрочных сплавов с высоким содержанием упрочняющей γ' -фазы определяется условием предельного ограничения сварочного тока и глубины проплавления основного металла. Опыт использования микроплазменной порошковой наплавки [4–8] свидетельствует, что технологическая прочность при однослойной наплавке кромок лопаток обеспечивается в довольно широком диапазоне параметров режимов ($I = 2...35$ А, $v = 0,2...5,0$ м/ч, $F_b < 30...35$ мм²), где глубина проплавления основного металла, как правило, не превышает 1 мм.

Анализ соответствующих режимов наплавки на узкую подложку $\delta \leq 3$ мм, считающихся близкими к оптимальным, показал, что при изменении площади поперечного сечения наплавляемого валика в 2...4 раза доля основного металла в наплавленном изменяется незначительно и не превышает

15 %. Соответственно, доля тепла, расходуемого на плавление основного металла, не превышает 2,5 % от эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги. Поэтому при переходе к многослойной наплавке кромки лопатки актуально формирование дополнительных критериев обеспечения технологической прочности.

Исходя из установленной в работах [11, 14] взаимосвязи склонности к образованию трещин для рассматриваемых сварных соединений и суммарных тепловложений в изделие, а также из изложенных в данной работе закономерностей управления поперечным сечением наплавляемого валика, таким дополнительным критерием технологической прочности может являться погонная энергия наплавки. Соответственно, с учетом ее величины для определенной ширины узкой подложки и необходимо выбирать площадь поперечного сечения наплавленного слоя при многослойной наплавке.

Выводы

1. Уточнен технологический диапазон энергетических показателей однослойной микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку шириной менее 3 мм, где при соблюдении прочих технологических рекомендаций обеспечивается технологическая прочность сварного соединения «основной-наплавленный металл», в котором по крайней мере один из материалов является никелевым жаропрочным сплавом и содержит более 55 об. % γ' -фазы: эффективная тепловая мощность микроплазменной дуги — 30...420 Вт; погонная энергия наплавки — 100...1600 Дж/мм; производительность наплавки — 0,3...3,0 г/мин; площадь поперечного сечения наплавленного валика — 1...25 мм².

2. В данном диапазоне в условиях ограниченной глубины проплавления основного металла технологическое управление формой и размерами поперечного сечения наплавляемого валика может осуществляться путем изменения эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги, погонной энергии наплавки, рационального выбора химического состава наплавленного металла и способа подачи порошка (порционная, непрерывная). Наиболее эффективными из них при постоянной ширине узкой подложки являются: погонная энергия — изменение до 2,5...4 раз, эффективная тепловая мощность микроплазменной дуги — изменение на 30...50 %, а также их сочетание — изменение до 3,5...6 раз. Выявленные закономерности управления формой валика применяются на АО «Мотор Сич» в условиях серийного ремонта лопаток авиационных ГТД.

3. Дополнительными критериями обеспечения технологической прочности при восстановительной многослойной микроплазменной порошковой наплавке кромок лопаток из никелевых жаропрочных сплавов могут являться величина погонной энергии и связанные с ней высота и площадь поперечного сечения слоя наплавляемого металла.

1. Гладкий П. В. Плазменная наплавка / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переpletчиков, И. А. Рябцев. – К.: Екотехнологія, 2007. – 292 с.
2. Перемиловский И. А. Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей / И. А. Перемиловский, В. С. Гейченко, И. И. Фрумин // Автоматическая сварка. – 1976. – № 5. – С. 54–56.
3. Петрик И. А. Дальнейшее развитие технологии упрочнения жароміцних нікелевих сплавів з вмістом γ' -фази 45..65 %: автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» / О. В. Яровицин. – Київ, ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2009 р. – 21 с.
5. Технологический семинар Deloro Stellite в Запорожье // Автоматическая сварка. – 2010. – № 1. – С. 59–62.
6. Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, А. В. Яровицин [и др.] // Автоматическая сварка. – 2010. – № 8. – С. 25–29.
7. Ющенко К. А. Совершенствование технологии восстановления верхней бандажной полки рабочих лопаток авиационного ГТД / К. А. Ющенко, А. В. Яровицин // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»: збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. – ІЕЗ ім. Є. О. Патона, Київ, 2012. – 612 с. – С. 506–509.
8. Жеманюк П. Д. Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства / П. Д. Жеманюк, И. А. Петрик, С. Л. Чигилейчик // Автоматическая сварка. – 2015. – № 8. – С. 43–46.
9. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. часть II / В. А. Богуслаев, В. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк [и др.]. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с.
10. Сорокин Л. И. Свариваемость литейных жаропрочных сплавов типа ЖС6 / Л. И. Сорокин, В. И. Лукин, Ю. С. Багдасаров // Сварочное производство. – 1997. – № 6. – С. 12–17.
11. Яровицин А. В. Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки / А. В. Яровицин // Автоматическая сварка. – 2015. – № 5-6. – С. 18–25.
12. Попов С.А. Шлифовальные работы / С. А. Попов. – М.: Высшая школа, 1987. – 383 с.
13. Профильное глубинное шлифование деталей газотурбинных двигателей / Э. В. Кондратюк, В. А. Леонтьев, А. В. Шуша [и др.] // Промышленность в фокусе. – 2013. – № 5. – С. 22–24.
14. Анализ процесса формообразования валика для условий наплавки на узкую положку / К. А. Ющенко, А. В. Яровицин, Г. Д. Хрущов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 9. – С. 22–29.
15. Microplasma powder deposition as a new solid freeform fabrication process / H. Wang, W. Jiang, M. Vallant M. [et al.] // Proc. Instn. Mech. Engrs. – 2003. – vol. 217. – Part B. J. [Engineering Manufacture]. – P. 1641–1650.
16. Jhavar Suyog. Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications / Suyog Jhavar, N. K. Jain, C. P. Paul // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – vol. 214, № 5. – P. 1102–1110.
17. Influence of various process conditions on surface finishes induced by direct metal deposition laser technique on a Ti–6Al–4V alloy/ Gharbi M., Peyre P., Gorny C. [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – vol. 213, № 5. – P. 791–800.
18. Математический энциклопедический словарь / [гл. ред. Ю. В. Прохоров]. – М.: Современная энциклопедия, 1988. – 848 с.

Поступила в редакцию 06.07.2016

**14-я МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ГРАЖДАНСКОМУ СУДОСТРОЕНИЮ, СУДОХОДСТВУ,
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОРТОВ И ОСВОЕНИЮ ОКЕАНА И ШЕЛЬФА**

НЕВА 2017

РОССИЯ ■ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ■ 19 – 22 СЕНТЯБРЯ 2017