



## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВАЛИКА ПРИ НАПЛАВКЕ НА УЗКУЮ ПОДЛОЖКУ

К.А. ЮЩЕНКО, А.В. ЯРОВИЦЫН, Г.Д. ХРУЦОВ, А.А. ФОМАКИН, Ю.В. ОЛЕЙНИК  
ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

При натурном моделировании технологически вероятных поперечных сечений валиков, наплавленных на узкую подложку шириной 0,5...5,0 мм, выполнен анализ геометрических закономерностей их формирования. Уточнены задачи для технологического управления формой однослойного валика и сформулирован ряд технологических критериев: эффективного наращивания наплаваемой узкой подложки, оптимальной полезной площади поперечного сечения валика и приемлемых боковых припусков на механическую обработку. Предложены формулы для оценочных инженерных расчетов, устанавливающие взаимосвязь между требуемой высотой наплавленного слоя, размерами валика, массой наплавленного металла и расходом присадки. Библиогр. 16, табл. 3, рис. 9.

*Ключевые слова:* микроплазменная порошковая наплавка; никелевые жаропрочные сплавы; узкая подложка; натурное моделирование поперечного сечения валика; технологические критерии формы валика

Значительный объем работ при ремонте деталей авиационных газотурбинных двигателей приходится на восстановление или упрочнение их уплотнительных и антивибрационных элементов шириной 0,5...5,0 мм и длиной от 10...15 мм до 2...3 м. Для решения данных задач достаточно широко применяется аргонодуговая [1, 2] или микроплазменная порошковая наплавка [3–5] с использованием в качестве присадки никелевых жаропрочных сплавов. Она выполняется в условиях свободного формирования валика на вертикально установленном конструктивном элементе детали. Под воздействием сил тяжести, давления дуги, внутреннего трения расплавленного металла (вязкость) и поверхностного натяжения в процессе наплавки формируется валик, контур поперечного сечения которого приближен к окружности или эллипсу (рис. 1). Для таких наплаваемых поверхностей в ИЭС им. Е.О. Патона принят специальный термин: «узкая подложка» — элементы поверхности основного металла, ширина которых не превышает ширины сварочной ванны [6, 7].

Для расширения представлений о геометрических и технологических закономерностях формирования наплаваемых на узкую подложку валиков для ограниченно свариваемых никелевых жаропрочных сплавов [8, 9] рассмотрим пример трехслойной микроплазменной порошковой наплавки фрагмента торца пера лопатки (рис. 2). Анализ режимов наплавки, выполненный по методике работы [10], показывает, что при ограниченном изменении сварочного тока (1...3 А) рост размеров поперечного сечения наплаваемого валика из сплава ЖС32 в пределах 2...4 мм сопровождается значительным увеличением тепловло-

жений. В свою очередь, возрастание более чем в 2 раза введенной за время горения дуги тепловой энергии способствует образованию микротрещин в наплавленном металле при последующей термической обработке по режиму гомогенизации для сплавов ЖС26 и ЖС32.

Ввиду того, что механизм технологического управления поперечным сечением наплавленного металла при наплавке узкой подложки шириной  $\delta = 0,5...5,0$  мм на данный момент изучен лишь фрагментарно [2, 3, 11], для формирования соответствующих представлений о целях и задачах такого управления целесообразно первоначально проанализировать ожидаемую форму наплавленных валиков в диапазоне его относительной ширины  $B/\delta = 1...10$  и относительной высоты  $H/\delta \leq 4$ . Эти показатели характеризуют совокупность размеров поперечных сечений валиков, которые могут в процессе микроплазменной и аргонодуговой на-

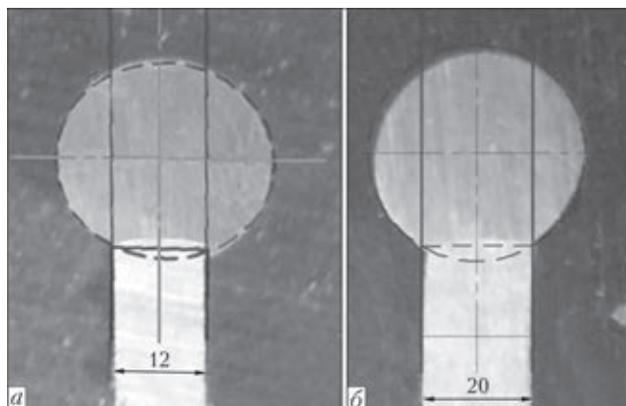


Рис. 1. Контур поперечного сечения валиков, наплавленных на узкую подложку различной ширины: а — эллипс; б — окружность

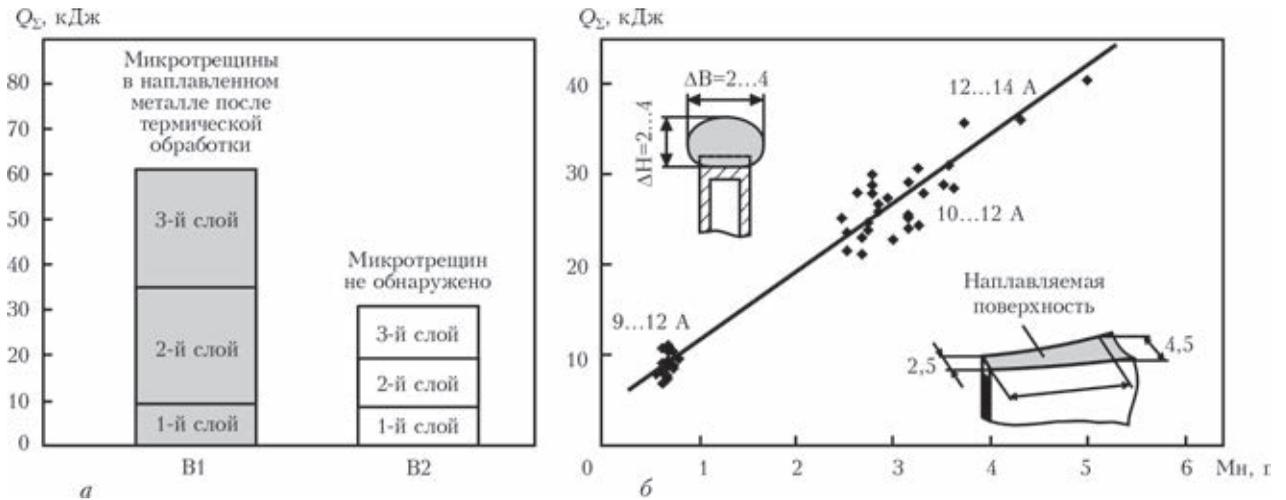


Рис. 2. Склонность к образованию микротрещин в наплавленном металле ЖС32 при 3-х слойной микроплазменной порошковой наплавке торца пера лопатки (а) и зависимость общих тепловложений в анод  $Q_{\Sigma}$  от массы  $M_n$  наплавляемого за один слой валика (б)

плавки удерживаться на рассматриваемой узкой подложке без применения формирующих приспособлений. Исходя из выше перечисленного, целью данной работы является:

- анализ закономерностей распределения наплавленного и основного металла в технологически вероятных поперечных сечениях валиков и формирование обобщенных критериев оптимальности их формы;

- вывод инженерных зависимостей для установления взаимосвязи между требуемой высотой наплавленного слоя, размерами валика, массой наплавленного металла и расходом присадки, необходимых для соответствующих ремонтно-восстановительных технологий.

Определения исходных геометрических показателей наплавленного на узкую подложку валика, необходимых для дальнейшего анализа его формы, приведены на рис. 3 и в табл. 1. Формулировки большинства из них авторы статьи постарались максимально приблизить к традиционно принятым для наплавленных на пластину валиков

[12, 13]. Ряд новых определений — эффективные высота валика  $h$ , поперечное сечение валика  $F_E$ , поперечное сечение наплавленного металла в валике  $F_{НЧ}$  введены из-за необходимости рассмотрения размеров прямоугольника со сторонами  $\delta$  и  $(h + h_{OM})$ , вписанного в контур валика. При анализе поперечного сечения валика принимались следующие допущения (см. рис. 3):

- контур валика является частью окружности или эллипса;

- линия сплавления основного и наплавленного металла проходит по отрезку АВ;

- площади соответствующего эллипса или окружности и контура поперечного сечения валика отличаются на величину сегмента  $\Delta F_1$ , которая равна площади верхнего усиления валика;

- расплавленный основной металл не выходит за пределы узкой подложки и локализуется в прямоугольнике со сторонами  $\delta$  и  $h_{OM}$ ;

- после механической обработки наплавленный металл имеет прямоугольное сечение со сторонами  $\delta$  и  $h_{OM} + h$ .

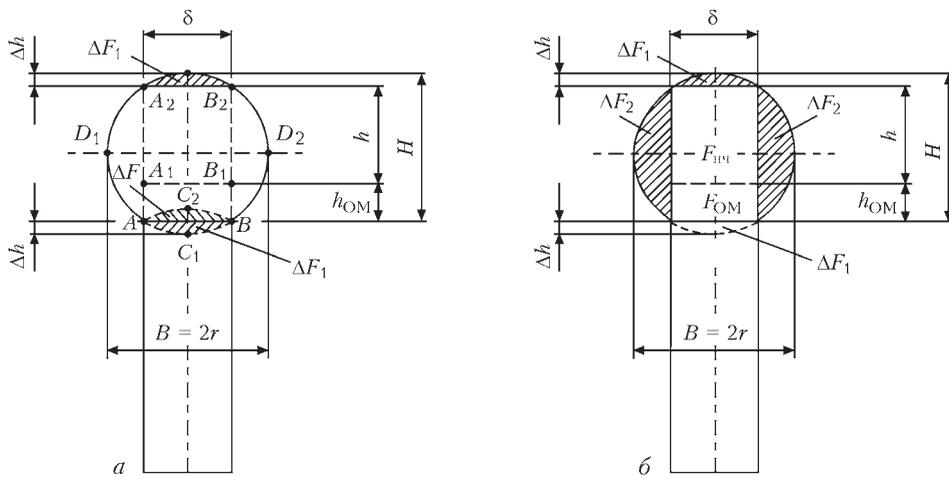


Рис. 3. Основные показатели поперечного сечения валика при однослойной наплавке на узкую подложку (обозначения см. в табл. 1). Заштрихованные части валика (б) удаляются при механической обработке наплавленного металла



Таблица 1. Основные геометрические показатели поперечного сечения валика, наплавленного на узкую подложку

| №  | Параметр  | Обозначения согласно рис. 3                 |
|--|---|---|
| <b>1. Размеры</b>  |   |   |
| 1.1  | Ширина узкой подложки   | $\delta$                                    |
| 1.2  | Ширина валика   | $B$   |
| 1.3  | Высота валика   | $H$   |
| 1.4  | Глубина проплавления основного металла                                | $h_{OM}$                                    |
| 1.5  | Эффективная высота наплавленного металла                              | $H$   |
| 1.6  | Эффективная высота валика   | $h_{OM} + h$                                |
| 1.7  | Толщина бокового усиления валика                                      | $\Delta p = 0,5(B - \delta)$                |
| 1.8  | Высота верхнего усиления валика                                       | $\Delta h = H - h - h_{OM}$                 |
| <b>2. Относительные размеры</b>                                    |   |   |
| 2.1  | Относительная ширина валика   | $B/\delta$                                  |
| 2.2  | Относительная высота валика   | $H/\delta$                                  |
| 2.3  | Относительная глубина проплавления основного металла                  | $h_{OM}/(h_{OM} + h)$                       |
| 2.4  | Относительная высота верхнего усиления валика                         | $\Delta h/(H + \Delta h)$                   |
| <b>3. Контур</b>   |   |   |
| 3.1  | Геометрическая фигура, соответствующая контуру валика                 | Замкнутая кривая $AC_1BD_2CD_1$             |
| 3.2  | Периметр контура валика   | Замкнутая кривая $ABD_2CD_1$                |
| <b>4. Площадь поперечного сечения</b>                              |   |   |
| 4.1  | Площадь проплавленного основного металла                              | $F_{OM} = h_{OM} \cdot \delta$              |
| 4.2  | Эффективная площадь наплавленного металла в валике                    | $F_{НЧ} = h\delta$                          |
| 4.3  | Эффективное сечение валика  | $F_E = F_{OM} + F_{НЧ}$                     |
| 4.4  | Площадь верхнего усиления валика                                      | сегмент $\Delta F_1$                        |
| 4.5  | Площадь бокового усиления валика                                      | сегмент $\Delta F_2$                        |
| 4.6  | Площадь наплавленного валика (ограниченная периметром контура валика) | $F_B = F_E + \Delta F_1 + 2\Delta F_2$      |
| 4.7  | Площадь, геометрической фигуры, соответствующей контуру валика        | $F_{ФКВ} = F_E + 2\Delta F_1 + 2\Delta F_2$ |
| <b>5. Отношение площадей элементов в поперечном сечении валика</b> |   |   |
| 5.1  | Доля основного металла  | $\gamma_{OM} = F_{OM}/F_B$                  |
| 5.2  | Относительная площадь эффективного сечения валика                     | $\gamma_E = F_E/F_B$                        |
| 5.3  | Относительная площадь эффективного сечения наплавленного металла      | $\gamma_{EH} = F_{НЧ}/F_B$                  |

Форма валиков изучалась путем натурального моделирования технологически вероятных поперечных сечений при варьировании параметров  $\delta$ ,  $H$ ,  $B$  и определения в программе системы автоматизированного проектирования технической документации Компас-3D V12 площадей ее составляющих (рис. 4). Рассматривались следующие наиболее

вероятные законы последовательного изменения геометрической фигуры, соответствующей контуру валика: окружность, ее диаметр увеличивается (рис. 5, а); эллипс, его горизонтальная ось расширяется до окружности (рис. 5, б); эллипс, его вертикальная ось вытягивается до окружности (рис. 5, в).

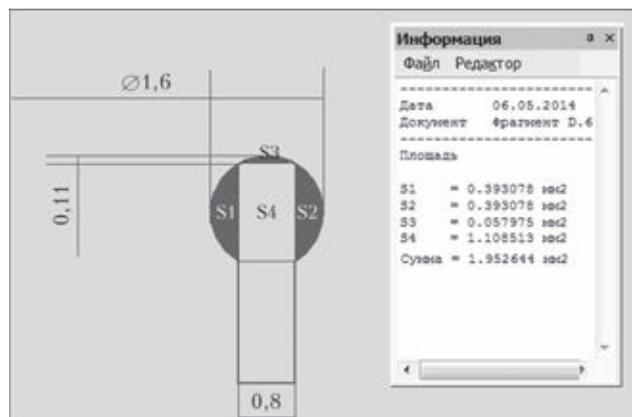


Рис. 4. Пример определения в системе автоматизированного проектирования Компас-3D V12 площади элементов поперечного сечения валика при их натурном моделировании

Первоначально натурное моделирование технологически вероятных форм поперечного сечения однослойного наплавленного металла выполнялось для узкой подложки  $\delta = 0,8; 1,5; 4,0$  и  $6,0$  мм в диапазонах соотношений ширины и высоты валика:  $B = (1 \dots 10) \delta$  и  $H \leq 4\delta$ . Количество проанализированных поперечных сечений составляло 40...50 шт. на каждый типоразмер ширины узкой подложки. Полученные массивы данных  $\gamma_E$  и  $B/\delta$  оценивались на принадлежность к общей зависимости  $\gamma_E = f(B/\delta; \gamma_{OM} = 0)$  как визуально, так и по статистическим критериям<sup>1</sup> [14]: Пирсона ( $R$ ), индекса детерминации ( $R^2$ ), Фишера ( $F$ ). Затем выявленные геометрические закономерности формы

<sup>1</sup> При разбиении  $\gamma_E = f(B/\delta)$  на ряд линейных участков.

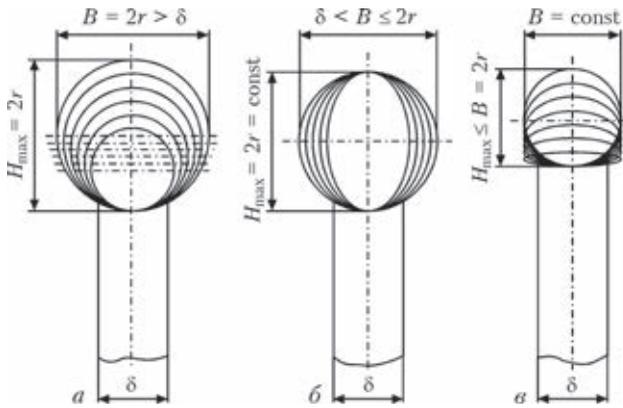


Рис. 5. Типовые изменения формы поперечного сечения валика при изменении параметров режима наплавки узкой подложки

валика выборочно проверялись для  $\delta = 0,5; 2,0; 3,0; 5,0; 8,0; 10,0$  мм путем случайного выбора сочетания ширины и высоты валика в этом же диапазоне; количество проанализированных вероятных сечений валиков составляло 10...15 шт. на каждый дополнительный типоразмер ширины узкой подложки.

Совокупность зависимостей  $\gamma_{EH} = f(B/\delta; \gamma_{OM})$ , полученных в результате обработки данных натурного моделирования технологически вероятных поперечных сечений наплавленных валиков представлена на рис. 6. Случай  $\gamma_{EH} < 0$  соответствует занижению узкой подложки относительно ее первоначального уровня  $Z_1Z_2$ ,  $\gamma_{EH} > 0$  — наращиванию. Аппроксимация степенной функцией совокупности точек  $B/\delta$  и  $\gamma_{OM}$  при которых  $\gamma_{EH} (B/\delta; \gamma_{OM}) = 0$  при  $B/\delta > 1,4$ , позволила связать условие наращивания узкой подложки с одним из важнейших показателей эффективности наплав-

ки — долей основного металла в наплавленном валике:

$$\gamma_o < \gamma_E = \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-0,866} \quad (1)$$

Таким образом, для повышения эффективности наращивания наплавленной узкой подложки с увеличением относительной ширины валика требуется более жестко ограничивать в нем долю основного металла. Следует также отметить, что для  $B/\delta = 1,28$  наблюдается максимум значений  $\gamma_E = 0,714$  (см. зависимость № 1 на рис. 6), а относительная площадь верхнего и боковых усиленных валиков при этом минимальна. С некоторым приближением соответствующими критерию максимума полезной площади поперечного сечения можно считать валики с  $B/\delta = 1,2...1,4$ , для которых  $\gamma_E > 0,7$ . Для  $B/\delta = 1,4...10,0$  величина  $\gamma_E$  в интервале значений 0,12...0,7 может быть уточнена при помощи зависимости (1).

Для анализа особенностей распределения металла между центральной частью и периферией валика необходимо предварительно уточнить долю основного металла. Содержание наплавленного  $\gamma_{EH}$  и основного  $\gamma_{OM}$  металла в центральной части валика:

$$\gamma_{EH} = \gamma_E - \gamma_{OM} \quad (2)$$

$$\gamma_{OM} = \frac{F_{OM}}{F_B} = \frac{h_{OM}\delta}{F_B} \quad (3)$$

где в поперечном сечении наплавленного валика:  $h_{OM}$ ,  $F_{OM}$  — соответственно глубина и площадь проплавления основного металла;  $F_B$  — площадь валика. Величина  $F_B$  может быть рассчитана как:

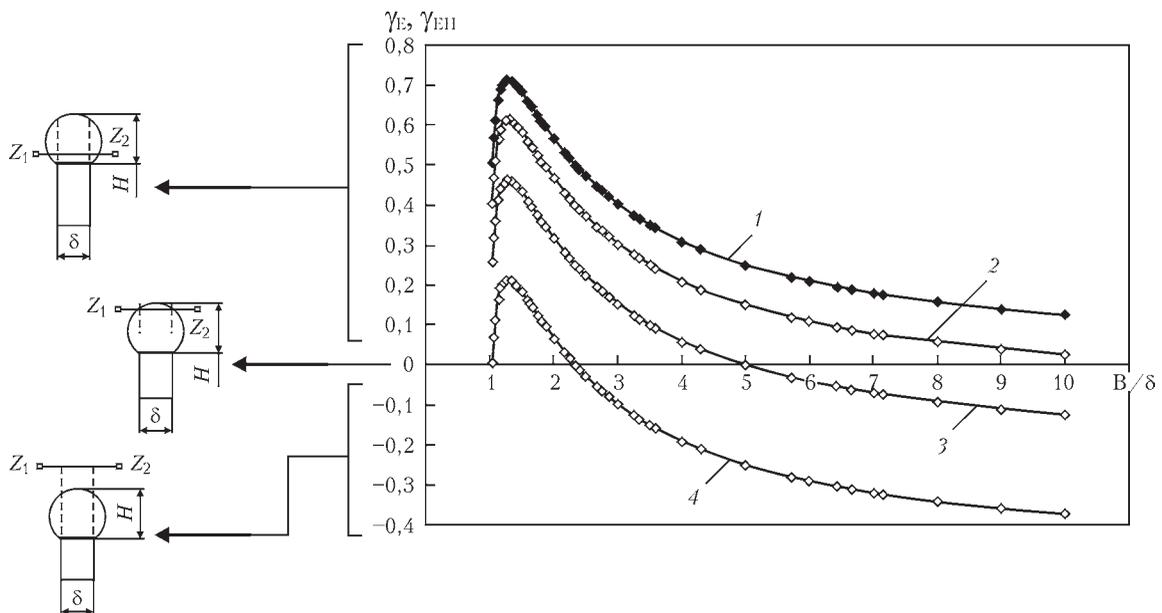


Рис. 6. Зависимость относительной площади эффективного сечения валика  $\gamma_E$  и относительной площади эффективного сечения наплавленного металла  $\gamma_{EH}$  от относительной ширины валика  $B/\delta$  (по данным статистической обработки результатов натурного моделирования).  $Z_1Z_2$  — уровень узкой подложки до наплавки валика; 1 —  $\gamma_E = \gamma_{EH}$  при  $\gamma_{OM} = 0$ ; 2 —  $\gamma_{EH}$  при  $\gamma_{OM} = 0,1$ ; 3 —  $\gamma_{EH}$  при  $\gamma_{OM} = 0,25$ ; 4 —  $\gamma_{EH}$  при  $\gamma_{OM} = 0,5$

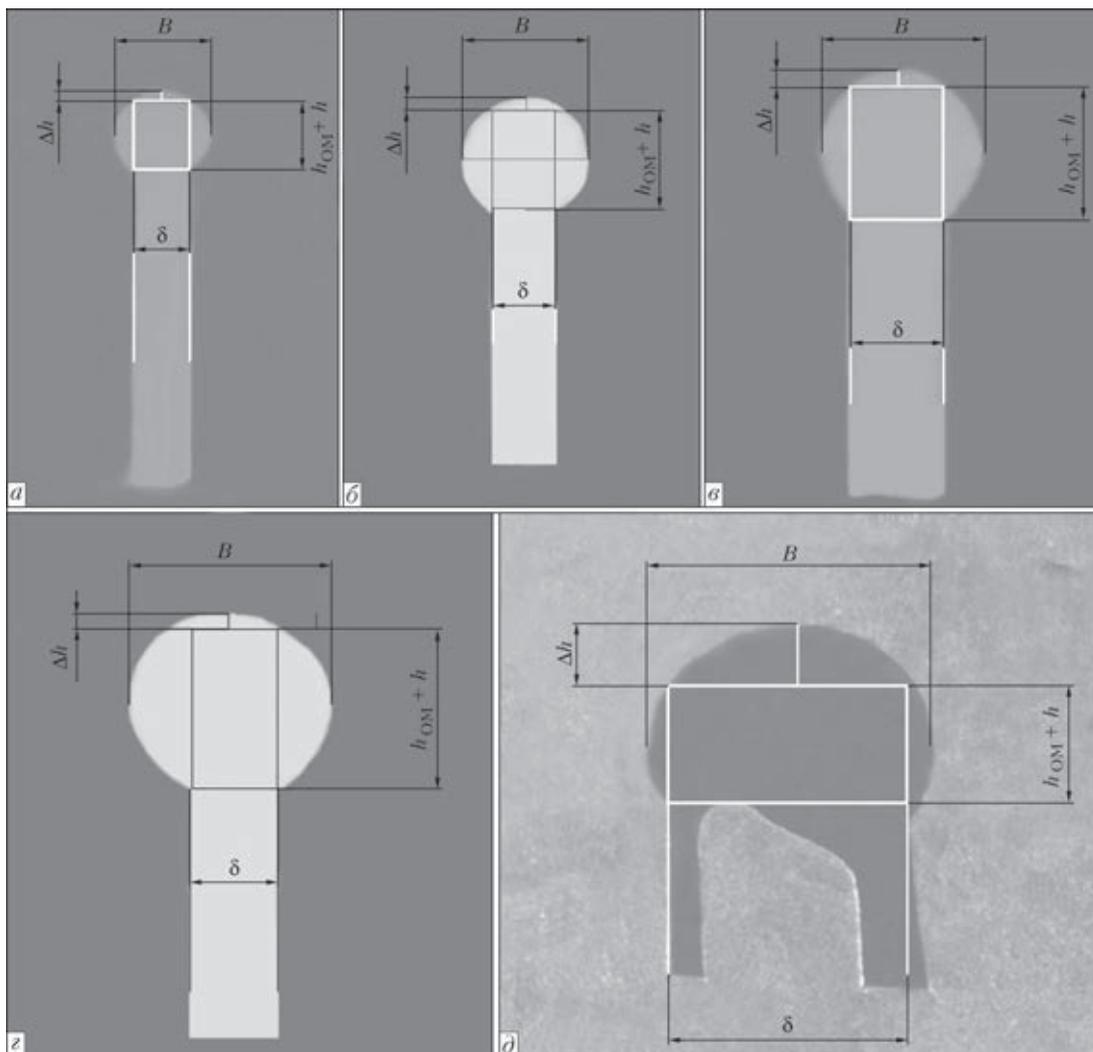


Рис. 7. Схема измерений размеров и внешний вид контуров поперечных сечений валиков, наплавленных на узкую подложку различной ширины (см. табл. 2)

$$F_B = F_{\text{ФКВ}} - \Delta F_1 = 0,25\pi B(h_{\text{ОМ}} + h) - \Delta F_1, \quad (4)$$

где  $F_{\text{ФКВ}}$  — площадь, ограниченная фигурой контура поперечного сечения валика (эллипс или окружность);  $\Delta h$ ,  $\Delta F_1$  — соответственно, величина и площадь верхнего усиления валика. В свою очередь, величину площади сегмента окружности (или в общем случае — эллипса)  $\Delta F_1$  можно приблизительно вычислить аналогично площади верхнего усиления стыкового сварного шва [13]:

$$\Delta F_1 = 0,73\Delta h\delta. \quad (5)$$

Для выполнения расчетов по зависимостям (1)–(5) остается определить величину верхнего усиления наплавленного валика  $\Delta h$ , которая свя-

зывает требуемую высоту наплавленного слоя с необходимой высотой валика. Для фигуры в виде окружности, соответствующей контуру валика, можно использовать формулу расчета его стрелы сегмента [15], однако для фигуры в виде эллипса точный расчет  $\Delta h$  затруднителен.

Обработка статистических данных натурального моделирования показала, что наиболее рационально данный параметр выражается через относительную высоту верхнего усиления валика  $\Delta h/(H + \Delta h)$ . Указанная зависимость с высокой степенью достоверности аппроксимируется степенной функцией:

Т а б л и ц а 2. Сравнение расчетной и фактической величины верхнего усиления валика  $\Delta h$ , наплавленного на узкую подложку различной ширины

| Параметр                 | Рис. 7, а<br>$\Delta = 1,2$ мм |       | Рис. 7, б<br>$\Delta = 1,2$ мм |       | Рис. 7, в<br>$\Delta = 2,0$ мм |       | Рис. 7, г<br>$\Delta = 2,0$ мм |       | Рис. 7, д<br>$\Delta = 5,0$ мм |       |
|--------------------------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|
|                          | Расч.                          | Факт. |
| $B$ , мм                 | –                              | 2,00  | –                              | 2,40  | –                              | 3,32  | –                              | 4,52  | –                              | 6,00  |
| $B/\delta$               | 1,67                           | –     | 2,00                           | –     | 1,66                           | –     | 2,26                           | –     | 1,20                           | –     |
| $h_{\text{ОМ}} + h$ , мм | –                              | 1,49  | –                              | 1,95  | –                              | 2,66  | –                              | 3,57  | –                              | 2,77  |
| $\Delta h$ , мм          | 0,20                           | 0,23  | 0,16                           | 0,20  | 0,36                           | 0,43  | 0,30                           | 0,22  | 1,06                           | 1,20  |



$$\frac{\Delta h}{H + \Delta h} = 0,3215 \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2,161} \quad (6)$$

Принимая во внимание, что высота валика  $H = h_{OM} + h + \Delta h$ , после ряда преобразований получим следующее выражение для верхнего усиления наплавленного валика:

$$\Delta h = \frac{0,3215 \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2,161} \cdot (h_{OM} + h)}{1 - 0,6430 \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2,161}} \quad (7)$$

Данные численного моделирования по зависимости (7) свидетельствуют, что при  $B/\delta > 2$  величина верхнего усиления валика не превышает 1 мм. В случае сочетания  $B/\delta < 2$  и эффективной высоты валика  $h_{OM} + h > 3...5$  мм величина  $\Delta h$  может составлять несколько мм, что необходимо учитывать при выборе размеров наплавляемого валика. Установлено (см. рис. 7, табл. 2), что для высоты верхнего усиления валика  $\Delta h$  достигается приемлемый уровень сходимости расчетных (7) и экспериментальных данных.

После подстановки в зависимость (3) выражений (4), (5), (7) и некоторых преобразований получим следующее выражение доли основного металла  $\gamma_{OM}$  через относительную глубину проплавления основного металла  $h_{OM}/(h_{OM} + h)$  и относительную ширину валика  $B/\delta$ :

$$\gamma_{OM} = \frac{h_{OM}}{h_{OM} + h} \cdot \frac{[1 - 0,6430 \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2,161}]}{0,25\pi \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2,161} - 0,2347 \cdot \left(\frac{B}{\delta}\right)^{-2,161}} \quad (8)$$

Построив на одном графике зависимости (1), (2), (8), оценим баланс распределения металла между эффективным сечением валика и его усилениями при относительной ширине валика более

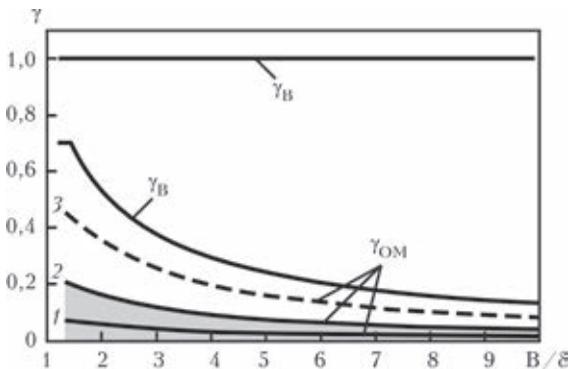


Рис. 8. Баланс распределения металла в наплавленном валике в зависимости от относительной ширины валика  $B/\delta$ : Обозначения:  $\gamma_B$  — весь металл;  $\gamma_E$  — доля металла в эффективном сечении валика;  $\gamma_{OM}$  — доля основного металла, соответствующая значениям относительной глубины проплавления: 1 —  $h_{OM}/(h + h_{OM}) = 0,1$ ; 2 —  $h_{OM}/(h + h_{OM}) = 0,33$ ; 3 —  $h_{OM}/(h + h_{OM}) = 0,66$ . Область заливки соответствует оптимальным режимам наплавки

1,4 (рис. 8). Данные численного моделирования показывают, что в области оптимальных режимов наплавки ( $h_{OM}/(h_{OM} + h) = 0,1...0,3$ ) содержание основного металла в валике может составлять 2...22 %. Эффективность заполнения наплавленным металлом центральной части валика последовательно снижается за счет увеличения площади боковых припусков при возрастании соотношения  $B/\delta$ .

В виду того, что доля основного металла в наплавленном валике ограничена, целесообразно уточнить представления и о закономерностях расхода присадочных материалов в процессе наплавки узкой подложки. Они определяются прямыми и непрямыми потерями присадки.

Первый вид потерь преимущественно обусловлен распределенным вводом дисперсной присадки в сварочную ванну [3, 16]. Вторым видом — «перераспределением» наплавленного металла из прямоугольника со сторонами  $\delta$  и  $(h + h_{OM})$  в область верхнего и боковых усиления (см. рис. 1, 3). Ограничение площади поперечных сечений  $\Delta F_1$  и  $\Delta F_2$  в наплавленном валике является одной из важных технологических задач для такого вида наплавки ввиду целесообразности снижения затрат тепла дуги и дорогостоящей присадки на наплавку «лишнего» объема валика, впоследствии удаляемого механической обработкой.

Производственная практика показала, что оптимальной трудоемкости последующей обработки валика отвечает диапазон толщин бокового усиления валика  $\Delta p = 0,5...1,25$  мм. Проверка соответствия критериев оптимального эффективного сечения и оптимальной трудоемкости обработки, наплавленных на узкую подложку  $\delta = 0,5...10,0$  мм, представлена в виде численного (табл. 3) решения системы уравнений:

$$\frac{B}{\delta} = \frac{\delta + 2\Delta p}{\delta} \quad (9)$$

$$1,2 \leq B/\delta \leq 1,4 \quad (10)$$

Известно, что массу наплавленного металла  $M_H$  можно определить исходя из площади поперечного сечения наплавленного металла  $F_H$ , длины валика  $L$  и плотности материала  $\rho_M$ :

$$M_H = F_H L \rho_M \quad (11)$$

Таблица 3. Изменение относительной ширины валика  $B/\delta$  в зависимости от ширины узкой подложки  $\delta$  при толщине бокового усиления валика  $\Delta p = 0,5...1,25$  мм

| $\delta$ , мм | $B/\delta$  | $\delta$ , мм | $B/\delta$  |
|---------------|-------------|---------------|-------------|
| 0,5           | 3,00...6,00 | 5,0           | 1,20...1,50 |
| 1,0           | 2,00...3,50 | 6,0           | 1,17...1,42 |
| 1,5           | 1,67...2,67 | 7,0           | 1,14...1,35 |
| 2,0           | 1,50...2,25 | 8,0           | 1,13...1,31 |
| 2,5           | 1,40...2,00 | 9,0           | 1,11...1,28 |
| 3,5           | 1,28...1,71 | 10,0          | 1,10...1,25 |

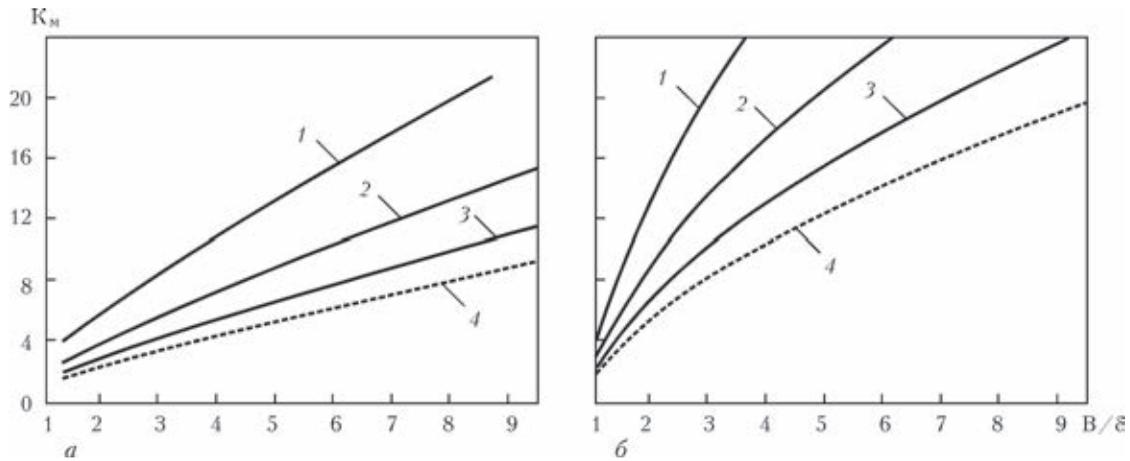


Рис. 9. Численное моделирование коэффициента удельного расхода  $K_M$  присадки в зависимости от относительной ширины валика  $B/\delta$  и относительной глубины проплавления:  $a - h_{OM}/(h + h_{OM}) = 0,25$ ;  $b - h_{OM}/(h + h_{OM}) = 0,66$ . Значения КИП: 1 — 0,4; 2 — 0,6; 3 — 0,8; 4 — 1,0

$$F_H = F_B - F_{OM} = F_B - h_{OM}\delta. \quad (12)$$

В свою очередь, площадь  $F_B$  можно выразить через относительную площадь эффективного сечения валика  $\gamma_E$ :

$$F_B = \frac{F_E}{\gamma_E} = \frac{(h_{OM} + h)\delta}{\gamma_E}. \quad (13)$$

С учетом (1) после некоторых преобразований получим:

$$F_B = (h_{OM} + h)\delta(B/\delta)^{0,866}. \quad (14)$$

Зависимости (11)–(14) позволяют оценить для узкой подложки необходимую массу наплавленного металла в зависимости от требуемой эффективной высоты наплавленного металла  $h$ . Динамику изменения затрат присадочного материала при ее восстановлении рационально продемонстрировать через коэффициент удельного расхода  $K_M$ , рассчитанный с учетом зависимостей (2), (8) и характеризующий увеличение общего количества присадки по сравнению с затраченной на заполнение центральной части валика:

$$K_M = \text{КИП}^{-1} \cdot (\gamma_{EH})^{-1}; \quad (17)$$

$$M_N = K_M M_0 N, \quad (18)$$

где КИП — коэффициент использования присадки;  $M_0$  — ее затраты на прямоугольник со сторонами  $\delta$  и  $h$  в одном изделии;  $N$  — количество восстанавливаемых наплавкой изделий. Результаты численного моделирования величины  $K_M$  (рис. 9, табл. 3) показывают существенную зависимость расхода присадки от ширины узкой подложки, коэффициента использования присадки, относительной ширины валика, относительной глубины проплавления основного металла. Рис. 9 также демонстрирует целесообразность разработки и реализации дополнительного блока технологических мероприятий, направленных на повышение эффективности использования дисперсной присадки (для микроплазменной порошковой наплавки).

Таким образом, установлено, что обобщенным геометрическим критерием формы рассматриваемых валиков является их относительная ширина. При ее значении 1,2...1,4 достигается максимальное соотношение площадей центральной части и общей площади поперечного сечения валика — примерно 0,7. Условие наращивания узкой подложки в процессе однослойной наплавки связано с ограничением доли основного металла в валике  $\gamma_{OM} < \gamma_E = (B/\delta)^{-0,866}$ . Для оптимальных режимов наплавки доля основного металла в зависимости от относительной ширины валика должна составлять 3...22 % полного объема валика. Возможность сочетания критериев оптимальной формы валика и оптимального припуска на механическую обработку 0,5...1,25 мм зависит от ширины узкой подложки и может быть: полное — для  $\delta = 5,0...7,0$  мм; частичное — для  $2,5 \leq \delta < 5,0$  мм. Для узкой подложки  $\delta < 2,5$  мм при указанных припусках на механическую обработку возможно лишь последовательное приближение к оптимальному распределению металла между центральной частью валика и его усилениями.

Полученные данные по закономерностям формообразования поперечного сечения наплавленного металла и требуемому расходу присадки также свидетельствуют, что оптимизация ширины наплавляемого на узкую подложку валика позволит на 10...40 % снизить количество «лишнего» наплавленного металла и, соответственно, уменьшить количество нерационально введенного в анод тепла. Это будет как благоприятно сказываться на свариваемости никелевых жаропрочных сплавов при наплавке (особенно многослойной) на узкую подложку, так и позволит существенно ограничивать расход присадочных материалов и трудоемкость данной ремонтно-восстановительной технологии.



**Выводы**

Выполнен анализ геометрических закономерностей формирования однослойного валика на узкой подложке шириной  $\delta = 0,5 \dots 5$  мм и уточнены задачи для технологического управления его формой в процессе наплавки в части, касающейся эффективного наращивания узкой подложки, оптимальной полезной площади поперечного сечения валика и приемлемых боковых припусков на механическую обработку.

Предложены формулы для оценочных инженерных расчетов, устанавливающие взаимосвязь между требуемой высотой наплавленного слоя, размерами валика, массой наплавленного металла и расходом присадки при наплавке узкой подложки. Они могут быть использованы при разработке ремонтно-восстановительных технологий для деталей авиационных газотурбинных двигателей.

1. *Перемиловский И.А., Гейченко В.С., Фрумин 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. *Особенности малоамперной аргодуговой и микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку / А.В. Яровицын, К.А. Ющенко, А.А. Наконечный, И.А. Петрик // Автомат. сварка.* – 2009. – № 6. – С. 37–42.
4. *Технологический семинар Deloro Stellite в Запорожье // Там же.* – 2010. – № 1. – С. 59–62.
5. *Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя*

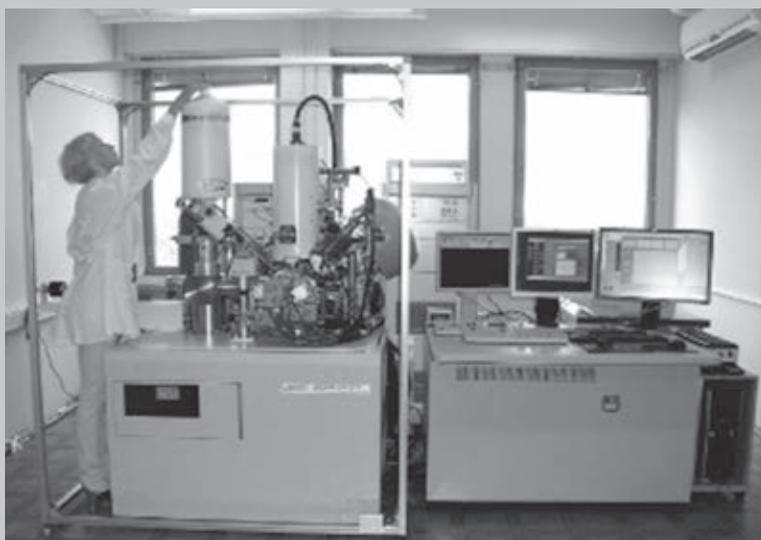
- ля Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / *К.А. Ющенко, В.С. Савченко, А.В. Яровицын и др. // Автомат. сварка.* – 2010. – № 8. – С. 25–29.
6. *Сом А.И., Гладкий П.В.* Особенности плазменной наплавки на узкую подложку / *Новые процессы наплавки, свойства наплавленного металла и переходной зоны // Под ред. И.И. Фрумина.* – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 20–24.
7. *Гладкий П.В., Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А.* Плазменная наплавка. – Киев: Экотехнология, 2007. – 292 с.
8. *Сорокин Л.И.* Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // *Свароч. пр-во.* – 1997. – № 4. – С. 4–11.
9. *Сорокин Л.И.* Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов // *Там же.* – 1999. – № 12. – С. 11–17.
10. *Яровицын А.В.* Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки // *Автомат. сварка.* – 2015. – № 5-6. – С. 18–25.
11. *О смещении наплавочного валика при ремонте лабиринтных уплотнений способом наплавки в защитных газах неплавящимся электродом / В.А. Гейкин, Г.В. Мартышин, Н.И. Шаронова, В.С. Фролов // Свароч. пр-во.* – 2011. – № 3. – С. 27–30.
12. *Петров Г.Л., Тумарев А.С.* Теория сварочных процессов [с основами физической химии]. – М.: Высшая школа, 1967. – 508 с.
13. *Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демьянцевич В.П.* Технология и оборудование сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
14. *Розанов Ю.А.* Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика: Учебник для студентов вузов. – 2-е изд. доп. – М.: Наука, 1989. – 312 с.
15. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике: для инженеров и учащихся вузов. – 11-е изд. – М.: Наука, 1967. – 608 с., С. 169.
16. *Некоторые пути снижения потерь присадочного порошка при микроплазменной порошковой наплавке / К.А. Ющенко, А.В. Яровицын, Д.Б. Яковчук и др. // Автомат. сварка.* – 2013. – № 9. – С. 32–38.

Поступила в редакцию 16.04.2015

**ЦЕНТР ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ**

Центр оснащен уникальным комплексом аналитического и исследовательского оборудования ведущих фирм Японии, США, Западной Европы и является единственным в Украине.

В центре работают высококвалифицированные специалисты (9 докторов и 16 кандидатов наук), многие из которых прошли стажировку в научно-исследовательских центрах ведущих европейских стран и США. В центре занимаются аналитическими, материаловедческими, физико-химическими исследованиями пирометаллургических процессов, а также фундаментальными исследованиями физических и металлургических процессов сварки и родственных технологий, выяснением причин и механизмов разрушения конструкций и сварных соединений.



Оже-микронд с полевым эмиссионным катодом JAMP-9500F (JEOL Ltd, Япония), укомплектованный энергодисперсионным спектрометром OXFORD EDS INCA Energy 350 для анализа элементов от бериллия до урана.