

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИСКРЕТНО-АДДИТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ МИКРООБЪЕМОВ МЕТАЛЛА, КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕГОСЯ ПРИ МНОГОСЛОЙНОЙ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

К. А. ЮЩЕНКО, А. В. ЯРОВИЦЫН, Н. О. ЧЕРВЯКОВ

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

Исследованы особенности изменения погонной энергии, площади поперечного сечения валика и производительности при однослойной микроплазменной порошковой наплавке никелевого жаропрочного сплава ЖС32 на узкую подложку шириной 1...2 мм. Установлено, что ряд ее режимов на сварочном токе 5...15 А отличается минимальной погонной энергией. Для минимального и максимального ее уровня проведена расчетная оценка напряженно-деформированного состояния сварного соединения при наращивании торца пластины однослойной и трехслойной наплавкой. Показано, что величина погонной энергии при микроплазменной наплавке определяет ширину зоны пластической деформации и величину суммарных пластических деформаций в результате повторных нагревов при многослойной наплавке. Предложены новые технологические принципы для выбора режимов многослойной и 3D-микроплазменной порошковой наплавки изделий из никелевых жаропрочных сплавов, обеспечивающие минимальные тепловложения в изделие и регламентирующие требования к величине сварочного тока, длительности существования металла сварочной микрованны в расплавленном состоянии и ее объему. Библиогр. 20, табл. 2, рис. 10.

*Ключевые слова:* микроплазменная порошковая наплавка, узкая подложка, никелевый жаропрочный сплав ЖС32, эффективная мощность нагрева изделия, погонная энергия, площадь поперечного сечения валика, объем сварочной микрованны, производительность наплавки, напряженно-деформированное состояние сварного соединения

Известно, что величина погонной энергии является важнейшим технологическим параметром, который при сварке плавлением конструкционных сталей характеризует размеры сварочной ванны, длительность ее существования и площадь участка зоны термического влияния (ЗТВ), нагретого до температуры более 600 °С [1].

Для условий сварки на токах более 50 А в защитных газах, под флюсом и покрытыми электродами величина погонной энергии может находиться в диапазоне 0,87...3,78 кДж/мм (мостовые конструкции) [2]; для орбитальной сварки технологических трубопроводов неплавящимся электродом в инертных газах — 0,6...0,9 кДж/мм [3]. При сварке низколегированных сталей, склонных к закалке, величину погонной энергии целесообразно регулировать, исходя из условий охлаждения металла ЗТВ в интервале 600...500 °С и диаграмм анизотермического распада аустенита [1–3]. При микроплазменной сварке величина погонной энергии, как правило, находится в диапазоне 20...35 Дж/мм при пропорциональном значении тока и скорости сварки в диапазоне 2...40 А и 5...87 м/ч соответственно для металла толщиной 0,1...0,5 мм [4].

При однослойной микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку [5] на токах до 35 А применительно к восстановлению кромок деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) из никелевых жаропрочных сплавов величина погонной энергии может составлять 0,25...3,0 кДж/мм [6]. Качество сварного соединения «основной-наплавленный металл» при многослойной микроплазменной порошковой наплавке никелевых жаропрочных сплавов по критерию склонности к образованию трещин зависит от величины суммарного тепловложения и производительности наплавки [7, 8].

Целью работы является изучение взаимосвязи тепловложения и размеров сечения валика (объема сварочной микрованны) при однослойной микроплазменной наплавке на узкую подложку шириной  $\delta = 1,0...2,0$  мм на токе 5...15 А с порционной подачей порошка никелевых жаропрочных сплавов с содержанием упрочняющей  $\gamma'$ -фазы более 45 об. %.

**Методика проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных.** Наплавки выполнялись в условиях свободного формирования на кромку пластины размерами 30...40×90...100 мм из аустенитной нержавеющей стали толщиной 1,0, 1,6 и 2,0 мм. Расстояние от наплавляемой поверхности до внешнего среза

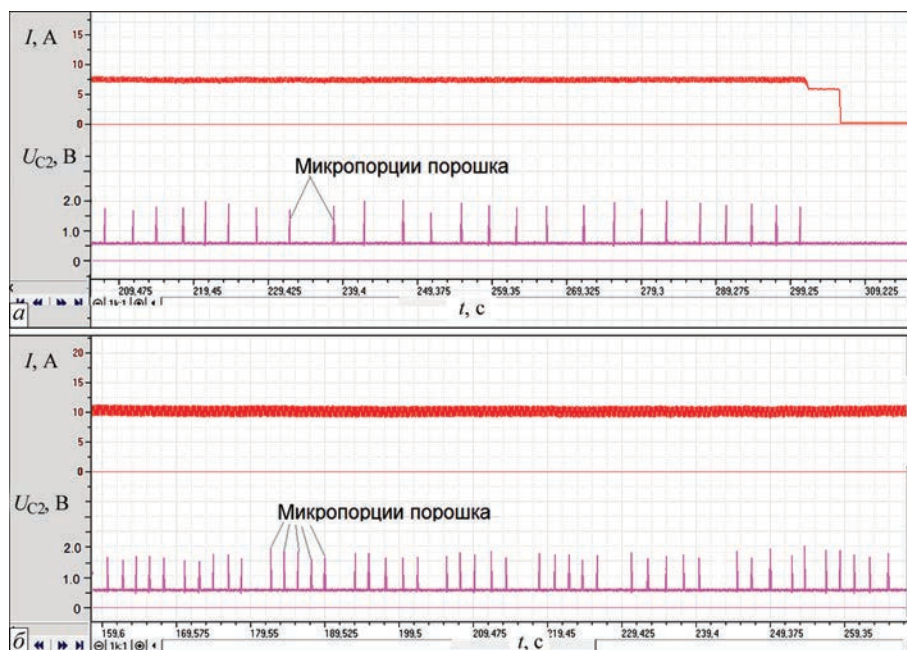


Рис. 1. Фрагменты осциллограмм микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку шириной  $\delta = 1,6$  мм с различным количеством микропорций присадочного порошка, вводимых в сварочную микрованну: *a* — 1 шт.; *б* — серия из 5 шт.  $U_{C2}$  — управляющий сигнал рабочего механизма дозатора, соответствующий подаче одной микропорции

микроплазмотрона составляло 5 мм. Использовался присадочный порошок никелевого жаропрочного сплава ЖС32 [9] фракцией +63...–160 мкм. Эксперименты выполняли на установке УПНС-304М2/МЗ. Масса порции порошка, подаваемой в столб микроплазменной дуги, составляла в среднем 0,14 г. Использовался микроплазмотрон ППС04 с диаметрами каналов сопел: плазменного — 2,5 мм; фокусирующего — 4,5 мм. В качестве плазмообразующего ( $Q_{пл} = 1,0$  л/мин) и транспортирующего ( $Q_{тр} = 4...5$  л/мин) газа был выбран аргон высшего со-

рта по ГОСТ 10157–79; в качестве защитного газа — смесь 95 % Ar + 5 %  $H_2$  ( $Q_3 = 7$  л/мин).

В процессе формирования валика в дискретно-аддитивном режиме после порционного наполнения расплавленной присадкой сварочная микрованна смещалась вперед и снова наполнялась ее новым объемом. В разных сериях экспериментов он последовательно увеличивался за счет ввода в зеркало сварочной ванны от 1 до 5 микропорций порошка (рис. 1) одновременно с постепенным изменением сварочного тока в диапазоне 5...15 А. Период порционной подачи дисперсной присадки находился в диапазоне  $T_{п} = 1,5...5,0$  с и выбирался таким образом [6], чтобы на переднем фронте наплавки обеспечивался угол смачивания основного и наплавляемого металла  $\alpha = 30...60^\circ$  (рис. 2, *a*), исходя из стабильного образования заданной формы валика. Если при плавном увеличении сварочного тока при подаче единичных микропорций порошка ЖС32 обеспечивалось выполнение данного условия при  $T_{п} = 1,5...1,8$  с, то далее в неподвижную сварочную микрованну вводилась дисперсная присадка серией из 2...5 микропорций. Во всех экспериментах глубина проплавления основного металла не превышала 1,5 мм, а доля основного металла в наплавленном составляла до 20 %. Пример наплавленного на узкую подложку валика представлен на рис. 2, *б*.

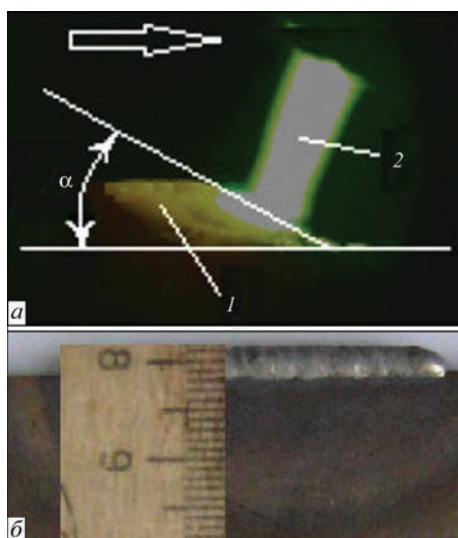


Рис. 2. Особенности формирования валика при наплавке на узкую подложку шириной  $\delta = 1,0...2,0$  мм: 1 — наплавляемый валик; 2 — микроплазменная дуга; стрелкой указано направление наплавки;  $\alpha$  — угол смачивания  $\alpha$  основного и наплавляемого металла на переднем фронте наплавки; *б* — внешний вид наплавленного валика

Обработку экспериментальных данных и расчет энергетических показателей режимов наплавки выполняли по методике [7]. Погонная энергия (с учетом эффективного КПД нагрева изделия [1]) определялась как отношение введенного в анод тепла микроплазменной дуги  $Q_{\Sigma}$  к приведенной

длине эллиптического цилиндра наплавленного валика  $L$ . Его площадь поперечного сечения  $F_B$  рассчитывалась по методике [8].

**Анализ экспериментальных данных.** Результаты экспериментов (рис. 3) свидетельствуют, что на узкой подложке шириной 1,0...2,0 мм в условиях свободного формирования наплавляемого валика удерживается сварочная микрованна с поперечным сечением  $F_B$  до 35 мм<sup>2</sup> (объемом примерно до 125 мм<sup>3</sup>). Это соответствует эффективной высоте наплавленного металла\*  $h = 3...4$  мм. Зависимость  $F_B = f(q_n)$  в диапазоне 75...250 Вт и 1,5...35 мм<sup>2</sup> соответственно описывается степенной функцией типа  $F_B = aq_n^n$ , коэффициенты которой изменяются с шириной узкой подложки. С ее увеличением уменьшается наклон данной зависимости к оси абсцисс, т. е. наращивание поперечного сечения наплавляемого валика при увеличении значений  $q_n > 175$  Вт протекает более интенсивно, в том числе, из-за повышения коэффициента использования дисперсной присадки при расширении сварочной микрованны [10].

Установлено, что в условиях дискретно-аддитивного формирования наплавляемого на узкую подложку валика ряд режимов микроплазменной порошковой наплавки отличается минимальной погонной энергией 490...700 Дж/мм (рис. 4, табл. 1). Такие режимы характеризуются:

- величиной эффективной тепловой мощности дуги, на 25...40 Вт больше соответствующего ее значения, достаточного для начала стабильного формирования наплавляемого металла;

- площадью поперечного сечения валика 5,5...7,5 мм<sup>2</sup> и эффективной высотой наплавленного металла до 2,0...2,5 мм.

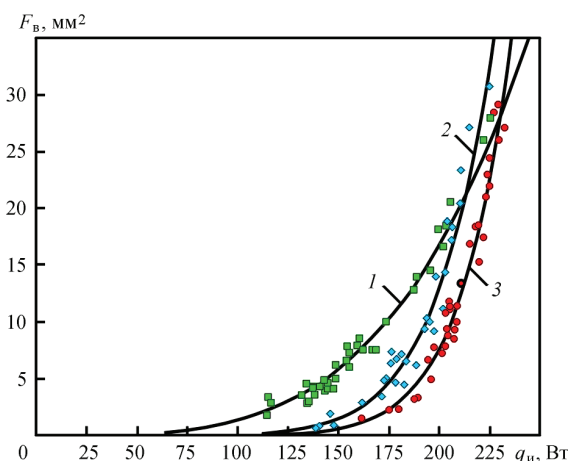


Рис. 3. Зависимость площади поперечного сечения наплавленного валика  $F_B$  от эффективной тепловой мощности дуги  $q_n$  при наплавке на узкую подложку шириной  $\delta$ : 1 — 1,0; 2 — 1,6; 3 — 2,0 мм

\* Высота прямоугольника шириной  $\delta$ , вписанного в контур поперечного сечения наплавленного валика и снизу ограниченного первоначальным уровнем неоплавленной поверхности узкой подложки [8]

**Таблица 1.** Характеристики режимов микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку  $\delta = 1,0...2,0$  мм, соответствующих минимуму погонной энергии  $Q_{\Sigma}/L$  ( $v$  — скорость наплавки;  $G_n$  — производительность наплавки)

$\delta$ , мм	$q_n$ , Вт	$F_B$ , мм <sup>2</sup>	$Q_{\Sigma}/L$ , Дж/мм	$v$ , м/ч	$G_n$ , г/мин
1,0	145	6,5	490	1,15	0,9
1,6	170	5,5	700	0,9	0,75
2,0	195	7,5	600	1,15	0,9

Примечание: по экспериментальным данным.

Таким образом показано, что положение минимума погонной энергии соответствует сварочному току, на 2,5...3,5 А больше ее значения, при котором начинается оплавление основного металла узкой подложки.

Увеличение погонной энергии в 2,0...2,5 раза при уменьшении на 30...40 Вт эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги от значения минимума погонной энергии обусловлено увеличением времени горения дуги между введением микропорций порошка для обеспечения на переднем фронте наплавки соответствующего угла контакта между основным и наплавленным металлом и стабильного формирования валика. Увеличение погонной энергии в 2,5...3,0 раза с правой стороны от значения минимума погонной энергии вызвано необходимостью увеличения времени горения дуги при введении серии из 2...5 микропорций присадочного порошка в неподвижное зеркало микрованны.

При последовательном увеличении эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги и производительности наплавки ее скорость изменяется в диапазоне 0,4...1,20 м/ч (рис. 5). При  $F_B = 5,5...7,5$  мм<sup>2</sup> наблюдаются ее максимальные значения 0,95...1,25 м/ч. Далее скорость наплавки замедляется до 0,4...0,6 м/ч, что обусловлено увеличением длительности наполнения микрованны наплавляемым металлом. Установлено, что режимы наплавки на узкую подложку, соответ-

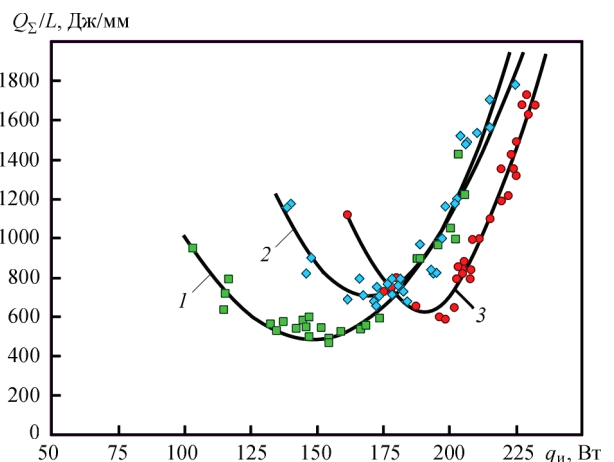


Рис. 4. Зависимость погонной энергии  $Q_{\Sigma}/L$  от эффективной тепловой мощности дуги  $q_n$  при наплавке на узкую подложку шириной  $\delta$ : 1 — 1,0; 2 — 1,6; 3 — 2,0 мм

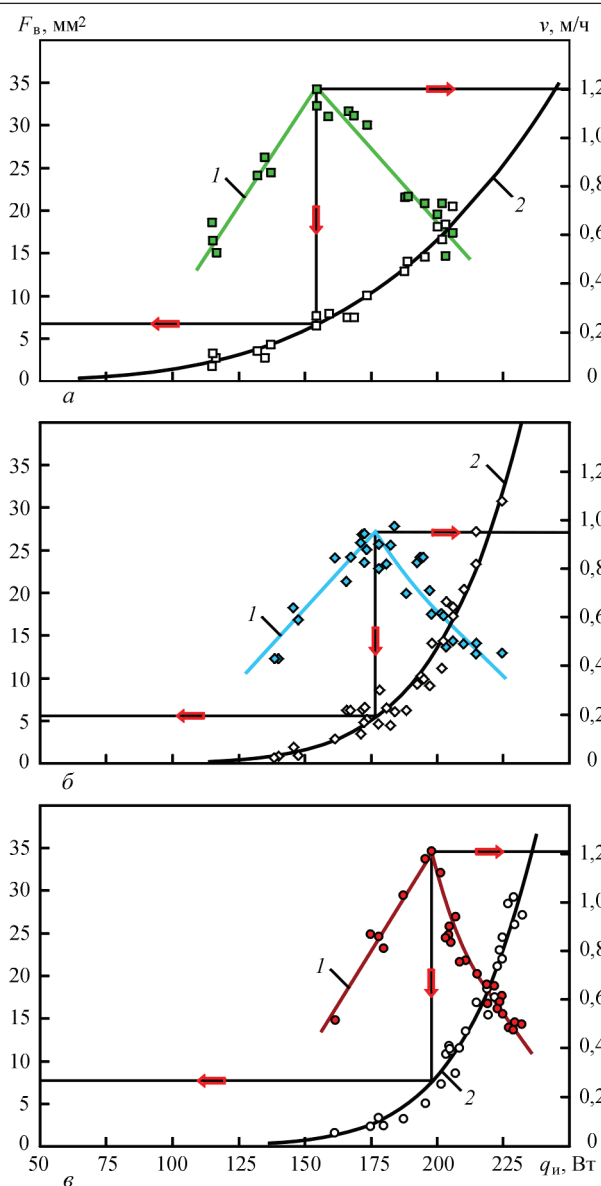


Рис. 5. Зависимость площади поперечного сечения наплавленного валика  $F_v$  и скорости наплавки  $v$  от эффективной тепловой мощности дуги  $q_n$  при наплавке на узкую подложку шириной  $\delta$ : 1 — 1,0; 2 — 1,6; 3 — 2,0 мм

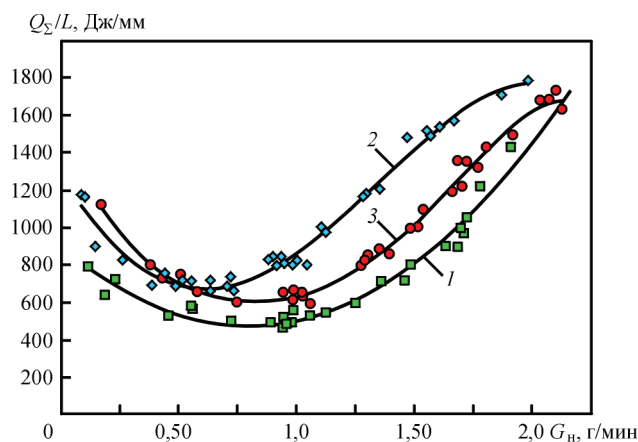


Рис. 6. Зависимость погонной энергии  $Q_{\Sigma}/L$  от производительности наплавки  $G_n$  на узкую подложку шириной  $\delta$ : 1 — 1,0; 2 — 1,6; 3 — 2,0 мм

ствующие минимальной погонной энергии  $Q_{\Sigma}/L$  и максимальной скорости наплавки  $v$  практически совпадают (см. рис. 3–5, табл. 1):  $\Delta q_n \leq 10$  Вт ( $I \leq 0,63$  А);  $\Delta v \leq 0,05$  м/ч;  $\Delta Q_{\Sigma}/L \leq 10$  Дж/мм.

Производительность наплавки  $G_n$  изменяется в диапазоне 0,1...2,3 г/мин пропорционально величине погонной энергии  $Q_{\Sigma}/L = 490...1800$  Дж/мм (рис. 6). При минимальных значениях погонной энергии наплавки она составляет 0,55...1,2 г/мин.

Для микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку  $\delta = 1,0...2,0$  мм с минимальной глубиной проплавления основного металла погонная энергия прямо пропорциональна частоте введения микропорций порошка, площади поперечного сечения наплавленного валика и производительности наплавки. Указанные факторы могут изменять ее величину в 2,4...3,7 раза.

**Оценка напряженно-деформированного состояния сварного соединения при однослойной и многослойной наплавке на узкую подложку.** Соотношение экспериментальных данных (рис. 4–6) с ранее опубликованными результатами [7, 8] позволяет предполагать, что даже в условиях ограниченных эффективной тепловой мощности дуги ( $q_n = 100...250$  Вт) и глубины проплавления основного металла (до 1,5 мм) при микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку  $\delta = 1,0...2,0$  мм с разными уровнями погонных тепловложений  $Q_{\Sigma}/L = 490...2000$  Дж/мм показатели напряженно-деформированного состояния сварного соединения «основной-наплавленный металл» могут существенно отличаться.

Соответствующая оценка базировалась на определении продольных сжимающих деформаций  $\epsilon_{xx}^0$  в тонкой пластине с градиентом температуры  $T(z)$  согласно расчетной схеме Б. Болли и Дж. Уэйнера [11] в состоянии предельного нагрева [1, 12] и работе Н. О. Окерблома [13] (приближенная оценка напряжений и деформаций свободной полосы, возникающих при наложении валика на одну из продольных ее кромок [12, 14]).

Для расчета продольных деформаций при одноосном напряженном состоянии, возникающих в тонкой пластине с градиентом температур  $T$  по оси  $z$  использовалась следующая математическая модель:

$$\epsilon_{xx}^0 = \frac{\alpha(T)}{[1-\nu]} \left[ -T(z)dz + \frac{1}{b} \int_0^b T(z)dz + \frac{12z}{b^3} \int_0^b T(z)zdz \right]; \quad (2)$$

$$\epsilon_{xx}^y = \frac{\sigma_T(T)}{E(T)}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_{xx}^0$ ,  $\epsilon_{xx}^y$  — соответственно полная и упругая продольная деформация;  $\alpha(T)$  — коэффициент линейного термического расширения,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $E(T)$  — модуль упругости (Юнга), МПа;  $\nu = 0,5$  — коэф-

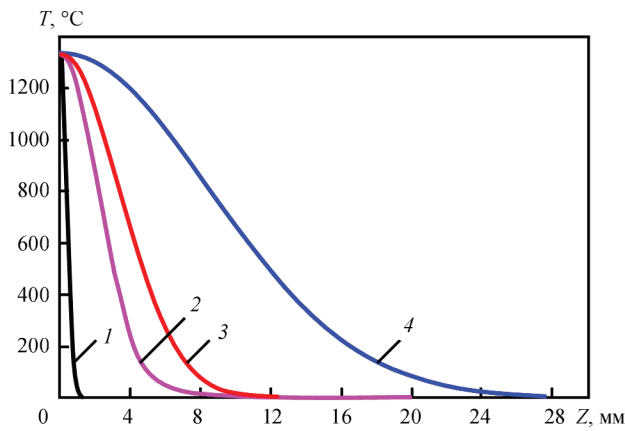


Рис. 7. Принятые экспоненциальные распределения функции  $T(z)$ , характерные для следующих режимов наплавки узкой подложки шириной  $\delta \leq 2$  мм: 1 —  $Z_{600\text{ }^\circ\text{C}} = 0,22$  мм, лазерно-порошковая наплавка [15–17]; 2, 3 —  $Z_{600\text{ }^\circ\text{C}} = 2,2$  и  $4,2$  мм, микроплазменная порошковая наплавка на режимах погонной энергии менее  $1000$  Дж/мм; 4 —  $Z_{600\text{ }^\circ\text{C}} = 10,5$  мм, микроплазменная порошковая наплавка на режимах с погонной энергией примерно  $2000$  Дж/мм

коэффициент Пуассона;  $b$  — размер узкой подложки в направлении оси  $z$ , м.

В описанной выше математической модели принимались следующие допущения и упрощения:

- валик наплавляется одновременно на всю длину торца пластины;
- термомеханические процессы протекают в упругом состоянии, а пластическая деформация определяется как разность общих продольных деформаций  $\epsilon_{xx}^0(T)$  и упругих продольных деформаций  $\epsilon_{xx}^y$  при заданном значении температуры;
- теплофизические зависимости  $\alpha(T)$ ,  $E(T)$  и  $\sigma_T(T)$  для сплава ЖС32 с кристаллографической ориентацией  $\langle 001 \rangle$  принимались по данным работ [18–19] с учетом дополнительной их экстраполяции от  $1000 \dots 1100$  °C до температуры солидуса  $T_s$  при кристаллизации никелевого жаропрочного сплава;

– в граничном состоянии нагрева распределение температуры задавалось экспоненциальной функцией типа  $T(z) = T_{\max} e^{-kz}$ , где в точке  $z = 0$  выполняется условие  $T_{\max} = T_s$ .

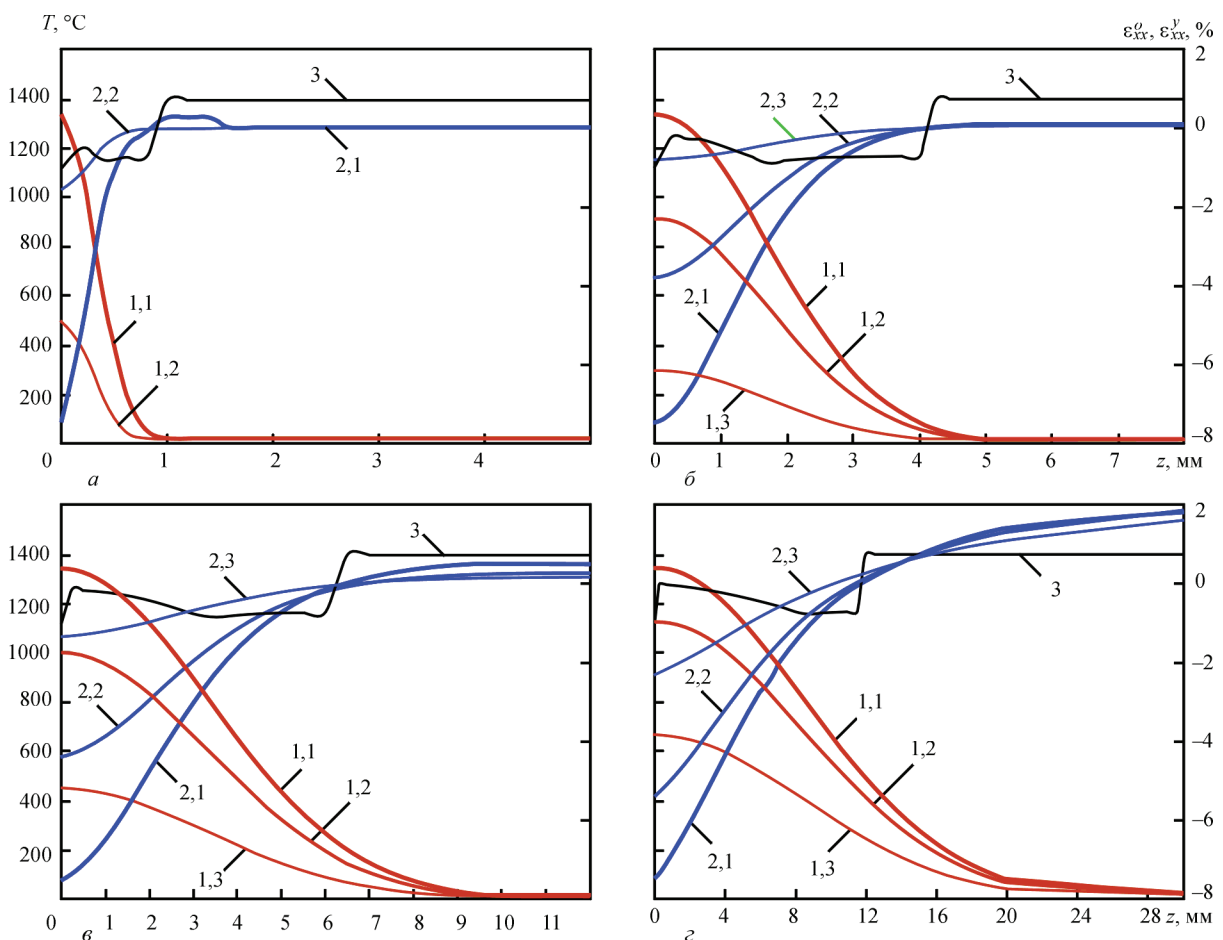


Рис. 8. Изменение распределения общих  $\epsilon_{xx}^0$  продольных деформаций в ЗТВ в состоянии предельного нагрева при 3-х слойной наплавке на узкую подложку из никелевого жаропрочного сплава ЖС32  $\langle 001 \rangle$ ; 1,1, 1,2, 1,3 — распределение температуры  $T(z)$  от линии сплавления для последнего наплавленного валика и при повторных нагревах двух предыдущих соответственно; 2,1, 2,2, 2,3 — распределение  $\epsilon_{xx}^0(z)$  от линии сплавления для последнего наплавленного валика и при повторных нагревах двух предыдущих соответственно; 3 — распределение упругих продольных деформаций  $\epsilon_{xx}^y(z)$  от линии сплавления в последнем наплавленном валике; а —  $Z_{600\text{ }^\circ\text{C}} = 0,22$  мм; б —  $Z_{600\text{ }^\circ\text{C}} = 2,2$  мм; г —  $Z_{600\text{ }^\circ\text{C}} = 4,2$  мм; з —  $Z_{600\text{ }^\circ\text{C}} = 10,5$  мм

**Таблица 2.** Распределение при максимальных нагревах  $|\Delta \epsilon_{xx}^0|$  и суммарные значения  $\sum |\Delta \epsilon_{xx}^0|$  амплитуд изменения продольных деформаций для 3-х слойной наплавки на узкую подложку  $\delta = 1,0...2,0$  мм в зависимости от величины температурного градиента  $Z_{600^\circ\text{C}}$  в ЗТВ (по данным рис. 8)

Слой наплавки	$ \Delta \epsilon_{xx}^0 $ , % при $Z_{600^\circ\text{C}}$ , мм			
	0,22	2,2	4,20	10,50
1 (текущий)	7,5	7,6	8,0	9,4
2	1,5	3,8	4,6	7,2
3	–	0,8	1,5	3,9
$\sum  \Delta \epsilon_{xx}^0 $	9,0	12,2	14,1	20,5

Такой подход через функцию температурного градиента  $T(z)$  позволил оценить продольные деформации  $\epsilon_{xx}^0(T)$  для реальных условий однослойной и 3-х слойной наплавки на узкую подложку шириной  $\delta = 1,0...2,0$  мм, где основным и наплавленным металлом являлся никелевый жаропрочный сплав ЖС32 <001> с содержанием упрочняющей  $\gamma'$ -фазы 62...65 об. %. Различные режимы/условия наплавки моделировались выбором значений коэффициента  $k$  исходя из положений изотермы  $600^\circ\text{C}$  (рис. 7).

С учетом эффективной высоты наплавленного слоя для лазерного (0,5 мм) и микроплазменного процесса (1,5...5,0 мм) при 3-х слойной наплавке также выполнялась оценка сжимающих продольных деформаций в точках максимальных температур нагревов:  $T_{\text{max1}} > T_{\text{max2}} > T_{\text{max3}}$  (на текущей линии сплавления и на ее предыдущих уровнях положения в глубине узкой подложки), где индексы 2, 3 — возрастающие порядковые номера наплавленных ранее валиков относительно текущей наплавки. Результаты численной оценки градиента продольных деформаций  $\epsilon_{xx}^0(T)$  по оси  $z$  для однослойной и 3-х слойной наплавки никелевого жаропрочного сплава ЖС32 в состоянии предельного нагрева приведены на рис. 8.

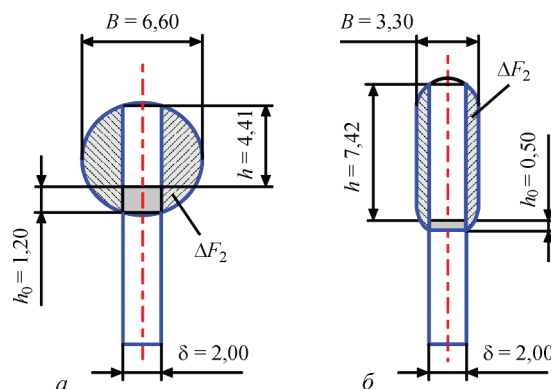
Оценка напряженно-деформированного состояния при однослойной наплавке торца тонкой пластины показывает, что максимальные продольные сжимающие деформации  $\epsilon_{xx}^0$  составляют примерно 7,5 % и не зависят от величины температурного градиента в ЗТВ, а амплитуда изменения продольных деформаций  $|\Delta \epsilon_{xx}^0|$  по глубине основного металла при различных условиях наплавки изменяется незначительно — с 7,5 до 9,5 %. Снижение соответствующего температурного градиента с 3350 до  $70^\circ\text{C}/\text{мм}$  ( $Z_{600^\circ\text{C}} = 0,22...10,5$  мм) вызывает расширение более чем в 20 раз участка ЗТВ, подверженного пластическим деформациям.

Для диапазона погонных энергий 490...2000 Дж/мм, соответствующего условиям микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку  $\delta = 1,0...2,0$  мм, зона пластических деформаций

составляет 3...10 мм. Оценка напряженно-деформированного состояния при 3-х слойной наплавке торца тонкой пластины показывает, что при повышенных значениях погонной энергии (примерно 1800...2000 Дж/мм) на 40...65 % возрастает величина суммарных пластических деформаций в процессе повторных нагревов по сравнению с ее значениями в случае менее 1000 Дж/мм (см. рис. 8, табл. 2). Суммарные значения амплитуд изменения продольных деформаций  $\sum |\Delta \epsilon_{xx}^0|$  в предельном состоянии нагрева для 3-х слойной наплавки на узкую подложку  $\delta = 1,0...2,0$  мм при  $Q_{\Sigma}/L < 1000$  Дж/мм не превышают максимальных значений пластичности никелевого жаропрочного сплава ЖС32 <001> при испытаниях на одноосное растяжение (14,5 % при  $T \leq 1000^\circ\text{C}$ , [19]). Вместе с уже полученными практическими результатами [7, 8, 20] это позволяет обосновать принципиальную возможность сохранения технологической прочности при многослойной микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку без проведения релаксирующей термической обработки после наплавки каждого валика.

**Оценка возможного технологического эффекта при натурном моделировании 3-х слойной микроплазменной порошковой наплавки с погонной энергией менее 1 кДж/мм.** В системе автоматизированного проектирования технической документации Компас-3D V12 выполнено натурное моделирование технологически вероятной формы поперечного сечения валиков, наплавленных на узкую подложку  $\delta = 2,0$  мм: за 1 слой с погонной энергией 2000 Дж/мм (рис. 9, а); за 3 слоя с погонной энергией послышной наплавки 600 Дж/мм (рис. 9, б).

Согласно методике [7] в качестве критериев сравнительной оценки принимались суммарные погонные тепловложения. Согласно методике [8]



**Рис. 9.** Натурное моделирование поперечных сечений валиков, наплавленных на узкую подложку  $\delta = 2,0$  мм с разными значениями погонной энергии:  $B$  — ширина наплавленного валика;  $h_0$  — глубина проплавления основного металла;  $h$  — эффективная высота наплавленного валика;  $\Delta F_2$  — площадь поперечного сечения бокового усиления валика, которое удаляется последующей механической обработкой

### 3D аддитивные технологии

– эффективная высота наплавки  $h$  и площадь боковых усилений валика  $2\Delta F_2$  (см. рис. 9). Установлено, что переход к 3-х слойной наплавке с  $Q_{\Sigma}/L = 600$  Дж/мм, наряду со снижением общих тепловложений в изделие примерно на 10 %, позволит увеличить эффективную высоту наплавки примерно на 70 % и снизить не прямые потери присадочного порошка (величину припусков на механическую обработку наплавленного валика) примерно в 2 раза.

**Обсуждение результатов исследований.** Микроплазменная порошковая наплавка с дискретно-аддитивным формированием может быть реализована в диапазоне технологических параметров, нижняя граница которого ограничена эффективной мощностью микроплазменной дуги, достаточной для оплавления основного металла, а верхняя – предельным объемом сварочной ванны, который может удерживаться на вертикально установленной узкой подложке. Такое формирование при однослойной наплавке на узкую подложку  $\delta = 1,0...2,0$  мм с использованием защитного газа 95 % Ag + 5 % H<sub>2</sub> характеризуется следующими показателями: эффективная тепловая мощность микроплазменной дуги  $q_{\text{н}} = 100...250$  Вт; погонная энергия  $Q_{\Sigma}/L = 490...2000$  Дж/мм; средняя скорость наплавки 0,4...1,25 м/ч; поперечное сечение валика 1,5...35 мм<sup>2</sup> (объем сварочной микрованны примерно от 3 до 125 мм<sup>3</sup>); производительность наплавки 0,1...2,3 г/мин. Ряд режимов внутри данного диапазона отличаются наименьшей погонной энергией 490...700 Дж/мм, которая соответственно обеспечивает наименьшие суммарные тепловложения в изделие, и определяется следующей совокупностью показателей: время существования металла сварочной микрованны в расплавленном состоянии — не более 3...6 с; площадь поперечного сечения наплавленного валика 5...8 мм<sup>2</sup>, объем сварочной микрованны примерно 15...25 мм<sup>3</sup>; доля основного металла в наплавленном менее 0,2; высота наплавленного валика 1,5...2,5 мм; производительность наплавки 0,55...1,0 г/мин; средняя скорость наплавки 0,9...1,25 м/ч.

Предварительно установлено, что в рассматриваемых сварных соединениях «основной-наплавленный металл» систем ЖС26-ЖС32 и ЖС32-ЖС32 при увеличении средних суммарных погонных тепловложений до 5 кДж/мм фиксируются трещины, достаточно легко выявляемые капиллярным контролем. Ограничение погонной энергии послойной наплавки при определенных предельно-допустимых значениях суммарных тепловложений в изделие, при которых склонность к образованию трещин в рассматриваемых сварных соединениях еще не проявляется, позволит

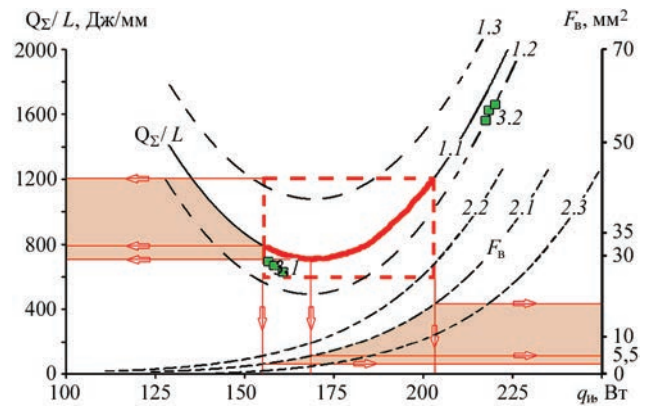


Рис. 10. Базовые принципы выбора рациональных режимов микроплазменной порошковой наплавки в зависимости от величины погонной энергии  $Q_{\Sigma}/L$ , площади поперечного сечения наплавленного валика  $F_{\text{в}}$  и эффективной тепловой мощности дуги  $q_{\text{н}}$ : 1.1 и 2.1 — зависимости  $Q_{\Sigma}/L$  и  $F_{\text{в}}$  для базового варианта режимов наплавки (95 % Ag + 5 % H<sub>2</sub>); 3.1 и 3.2 – рационально и нерационально выбранные импульсные режимы наплавки; 1.2 и 2.2 — предполагаемое изменение за счет оптимизации состава защитного газа/условий защиты сварочной микрованны/качества дисперсной присадки; 1.3 и 2.3 — режимы наплавки, отличающиеся нерациональным выбором ее технологических параметров, показателей качества присадочного порошка или конструкции соплового узла микроплазматрона

существенно увеличивать число слоев наплавленного металла и, соответственно, высоту восстанавливаемого участка на кромке детали авиационного ГТД.

С точки зрения свариваемости никелевых жаропрочных сплавов режимы многослойной наплавки (в перспективе и 3D-наплавки) с наименьшей погонной энергией также являются более предпочтительными ввиду снижения ширины зоны пластических деформаций в ЗТВ в 2,0...3,3 раза и суммарных пластических деформаций в процессе повторных нагревов на 40...65 % по сравнению с режимами при  $Q_{\Sigma}/L = 1800...2000$  Дж/мм.

Обобщенный алгоритм выбора рациональных режимов послойной микроплазменной порошковой наплавки, базирующийся на соблюдении принципа минимума погонной энергии, предложен на рис. 10 (на примере для узкой подложки  $\delta = 1,6$  мм). Пунктиром выделена та область режимов наплавки, в которой целесообразно проводить дальнейшую оптимизацию ее параметров путем применения импульсных режимов наплавки, улучшения условий защиты сварочной микрованны и повышения качества присадочного порошка. При импульсном сварочном токе дополнительными критериями рационального выбора технологических параметров соответствующих режимов наплавки будут являться меньшие значения эффективной тепловой мощности дуги, погонной энергии и ширины наплавленного валика по сравнению с соответствующими значениями данных показателей для постоянного сварочного тока.

## Выводы

1. При сварочном токе 5...5 А оценен диапазон технологических параметров микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку шириной 1...2 мм при дискретно-аддитивном формировании наплавляемого металла. Установлено, что в защитном газе 95 % Ar + 5 % N<sub>2</sub> ряд ее режимов отличается наименьшей погонной энергией 490...700 Дж/мм и характеризуется ограничением поперечного сечения валика и времени существования металла сварочной ванны в расплавленном состоянии соответственно в пределах 5...8 мм<sup>2</sup> и 3...6 с.

2. Показано, что такие режимы многослойной наплавки никелевых жаропрочных сплавов с высоким содержанием упрочняющей  $\gamma'$ -фазы отличаются снижением ширины зоны пластических деформаций в ЗТВ в 2,0...3,3 раза, суммарных пластических деформаций в процессе повторных нагревов — на 40...65 %. Ожидаемый технологический эффект при примерно одинаковых общих тепловложениях также уменьшение величины припусков на механическую обработку валика в 2 раза и увеличение эффективной высоты наплавленного металла на 70 %.

3. Предложены новые технологические принципы для выбора режимов многослойной или 3D-микроплазменной порошковой наплавки изделий из никелевых жаропрочных сплавов. Они заключаются в обеспечении наименьшего возможного уровня погонной энергии такого процесса, в первую очередь за счет регулирования поперечного сечения наплавляемого валика и времени существования металла сварочной микрованны в расплавленном состоянии.

1. Теоретические основы сварки: / В. В. Фролов, В. А. Винокуров, В. Н. Волченко [и др.]; под ред. В. В. Фролова. — М.: Высшая школа, 1970. — 592 с.
2. Исследование влияния режимов полуавтоматической сварки на выпрямителях типа ВД-506ДК металлопорошковой проволокой POWER BRIDGE 60M в смесях газов на механические и вязко-пластические свойства наплавленного металла при сварке мостовых конструкций / М. В. Карасев, В. Г. Гребенчук, Д. Н. Работинский [и др.] // Сварка и диагностика. — 2009. — № 4. — С. 19–25.
3. Управление структурой сварных соединений при орбитальной TIG-сварке технологических трубопроводов компрессорных станций / А. В. Шипилов, А. В. Коновалов, В. В. Бровка [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2011. — № 6. — С. 44–52.
4. Микроплазменная сварка / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, Д. А. Дудко [и др.]. — К.: Наукова думка, 1979. — 248 с.

5. Гладкий П. В. Плазменная наплавка / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев. — К.: «Экотехнология», 2007. — 292 с.
6. Яровицин О. В. Микроплазмовое порошковое наплавление жаропрочных никелевых сплавов с вмістом  $\gamma'$ -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. С. О. Патона, 2009 р. — 21 с.
7. Яровицын А. В. Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки / А. В. Яровицын // Автоматическая сварка. — 2015. — № 5-6. — С. 18–25.
8. Анализ процесса формообразования валика для условий наплавки на узкую подложку / К. А. Ющенко, А. В. Яровицын, Г. Д. Хрущов [и др.] // Автоматическая сварка. — 2015. — № 9. — С. 22–29.
9. Мелехов Р. К. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. Властивості. Деградація / Р. К. Мелехов, В. І. Похмурський. — К.: Наукова думка, 2003. — 384 с.
10. Некоторые пути снижения потерь присадочного порошка при микроплазменной порошковой наплавке / К. А. Ющенко, А. В. Яровицын, Д. Б. Яковчук [и др.] // Автоматическая сварка. — 2013. — № 9. — С. 32–38.
11. Боли Б. Теория температурных напряжений. / Б. Боли, Дж. Уэйнер; перевод с англ. под ред. Э.И. Григольюка. — М.: Мир, 1964. — 518 с.
12. Окерблом Н. О. Сварочные деформации и напряжения / Н. О. Окерблом. — М.-Л.: МАШГИЗ, 1948. — 252 с.
13. Талыпов Г. Б. Сварочные деформации и напряжения / Талыпов Г. Б. — Л.: Машиностроение, 1973. — 280 с.
14. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека. — К.: Изд-во «Индром», 1998. — 640 с.
15. Melt pool size control in thin-walled and bulky parts via process maps // Proceedings of 12th Solid freeform fabrication symposium. — University of Texas at Austin, 2001. — P. 432–440.
16. Vasinonta A. Process maps for predicting residual stress and melt pool size in the laser-based fabrication of thin-walled structures / A. Vasinonta, J. L. Beuth, M. Griffith // Journal of Manufacturing Science and Engineering. — 2007. — Vol. 129, № 1. — P. 101–109.
17. P. Aggaransi. Localized preheating approaches for reducing residual stress in additive manufacturing / P. Aggaransi, J. L. Beuth // Journal of Manufacturing Science and Engineering. — 2007. — Vol. 129, № 1. — P. 709–720.
18. Будиновский С. А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин / С. А. Будиновский, Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджан // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2011. — Серия «Машиностроение». — С. 26–37.
19. Голубовский Е. Р. Закономерности изменения аксиальной и азимутальной анизотропии прочностных характеристик монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов для лопаток ГТД / Е. Р. Голубовский, И. Л. Светлов, К. К. Хвацкий // Авиационно-космическая техника и технология. — 2005. — № 10(26). — С. 50–54.
20. 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.

Поступила в редакцию 28.02.2016