

Механизм формообразования плоских поверхностей электрической дугой

* В. М. Боков, ** О. Ф. Сиса, В. Я. Мирзак

Центральноукраинский национальный технический университет,
г. Кропивницкий, 25006, Украина, *e-mail: victor.alia.knty@gmail.com; **e-mail: sisaoleh@ukr.net

Предложен новый способ высокопроизводительной размерной обработки металлов электрической дугой (РОД) двух одинаковых плоских поверхностей в деталях из труднообрабатываемых материалов в биполярном режиме без традиционного применения электрода-инструмента, который по сравнению со способом РОД с применением электрода-инструмента обеспечивает повышение производительности обработки на 230%. Показано, что при переходе от униполярной РОД твердого сплава ВК-15 графитовым электродом-инструментом к биполярной РОД двух образцов из этого же сплава наблюдается существенное увеличение тепловой энергии катодной области за счет энергии столба дуги, которая может превысить тепловую энергию анодной области и вызвать инверсию, то есть изменение направления преобладающей электрической эрозии. Это увеличение тепловой энергии катодной области дуги объясняет увеличение производительности биполярной РОД двух образцов из твердого сплава ВК-15 по сравнению с униполярной.

Ключевые слова: электрическая дуга, гидродинамический поток, биполярный режим, твердый сплав.

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.5281/zenodo.1297935

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов, которых все больше появляется благодаря внедрению современных технологий в машиностроении [1–3], часто возникает потребность быстрого снятия большого припуска под последующую чистовую обработку. К таким деталям относятся пуансоны, матрицы, прокатный инструмент (валки) из закаленных сталей и сплавов, а также из твердых сплавов. Для снятия этого припуска обычно используются электроэрозионные методы обработки [4–5], которые для разрушения электрода-заготовки (ЭЗ), как правило, применяют нестационарные формы электрического разряда (электрическую искру или электрический импульс). При этом обработка сопровождается паузами, а поэтому отличается низкой производительностью.

Известно, что производительность процесса зависит от интенсивности введения в зону обработки тепловой энергии [6–8] (через силу технологического тока). В то же время стабильность процесса, при прочих равных условиях, определяется балансированием между количеством разрушенного и вынесенного за пределы межэлектродного промежутка металла (продуктов эрозии). Понятно, что наибольшую производительность электроэрозионной обработки можно достичь, когда тепловая энергия вводится в зону обработки непрерывно, то есть без пауз

(когда скважность $q = 1$). При этом инструментом становится электрическая дуга.

Из работ [9–11] известен способ размерной обработки металлов электрической дугой (РОД). В этом процессе непрерывность горения дуги во времени и возможность введения в зону обработки большой мощности технологического тока обеспечивают десятикратное и более увеличение производительности по сравнению с электроимпульсной обработкой. Процесс РОД обычно осуществляется с использованием графитового электрода-инструмента (ЭИ). Электрическую дугу в поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости возбуждают между ЭЗ и ЭИ. Поэтому часть энергии, которая подводится в зону обработки, расходуется не на пользу, а именно на разрушение ЭИ.

По мнению авторов, производительность обработки плоских поверхностей можно существенно повысить, если использовать указанную выше часть энергии для разрушения ЭЗ.

Настоящая работа посвящена исследованию нового способа высокопроизводительной электродуговой обработки [12], при котором электрическая дуга возбуждается между одинаковыми плоскими поверхностями двух электродов-заготовок, то есть без традиционного применения электрода-инструмента.

МЕТОДИКА

В работе для обоснования новой технологической схемы формообразования плоской

Таблица 1. Сравнительный анализ технологических схем формообразования плоской поверхности способами РОД с применением и без применения электрода-инструмента и эпюры скоростей потока в торцевом межэлектродном зазоре

Фаза обработки	Известный способ РОД плоской поверхности: электродная пара «графитовый ЭИ-сплав ВК15», униполярный режим (серия 1)	Новый способ РОД плоской поверхности: электродная пара «сплав ВК15-сплав ВК15», Биполярный режим (серия 2)
Начальная		
Промежуточная		
<p>Примечание. 1 – графитовый ЭИ; 2 – сплав ВК15; 3 – дуга; 4 – продукты эрозии; 5 – гидродинамический поток.</p>		

поверхности использовался метод сравнительного анализа. Объектами сравнения были способы РОД плоской поверхности с применением и без применения ЭИ (табл. 1). Так, в известном способе РОД плоской поверхности электрическая дуга в униполярном режиме горит в гидродинамическом потоке рабочей жидкости между графитовым ЭИ и ЭЗ. В результате наблюдаются: сравнительно низкая производительность процесса, так как часть энергии расходуется на разрушение графитового ЭИ; значительная неплоскость, вызванная увеличением торцевого межэлектродного зазора (МЭЗ) в направлении эвакуации продуктов эрозии преимущественно за счет ЭЗ; повышенное сопротивление течению жидкости, вызванное износом ЭИ, что требует повышенного расхода электроэнергии для создания необходимого гидродинамического режима потока в зоне горения электрической дуги. В предлагаемом способе РОД плоской поверхности используется новая технологическая схема формообразования, при которой обрабатываются одновременно два ЭЗ, так как электрическую дугу в гидродинамическом потоке жидкости возбуждают между их плоскими одинаковыми поверхностями. Но, в отличие от известного способа, для обеспечения равномерности съема металла с обоих ЭЗ полярность обработки периодически меняют.

Такой режим в дальнейшем будем называть биполярным. Новая технологическая схема формообразования имеет ряд преимуществ. Во-первых, она способствует более высокой производительности обработки за счет полного использования электрической энергии и одновременной обработки двух деталей. Во-вторых, она обеспечивает примерно в два раза меньшую неплоскость по сравнению с известной за счет особенности ее формирования: увеличение МЭЗ на выходе потока из него происходит равномерно как за счет верхнего, так и за счет нижнего ЭЗ. В-третьих, она так же, как и известная схема, позволяет управлять равномерностью распределения скоростей потока в радиальном направлении торцевого МЭЗ и тем самым обеспечивает равномерное качество обработки плоской поверхности. В-четвертых, она гарантирует меньшую себестоимость РОД плоских поверхностей, так как отпадает необходимость в изготовлении и применении сравнительно дорогих графитовых ЭИ. И наконец, в-пятых, она позволяет получать продукты эрозии электродов без посторонних примесей как ценный продукт для дальнейшего использования.

Моделирование физико-технологических характеристик двух способов РОД плоских поверхностей осуществлялось с использованием пакета прикладных программ «ПРИАМ».

Таблица 2. Математические модели технологических характеристик процесса РОД

Математическая модель	Масштабные соотношения факторов
Униполярный режим, электродная пара «графитовый ЭИ – твердый сплав»	
$M = 1018 + 772x_1 - 108x_3 - 85x_2 - 72x_1x_3 - 60x_1x_2$	$x_1 = 0,00667(X_1 - 250)$ $x_2 = 5(X_2 - 1)$ $x_3 = 0,00623(X_3 - 560,5)$ $x_4 = 0,667(X_4 - 2,5),$
$M_a = 3,52 + 0,982x_1 - 0,403x_3 - 0,311x_2 + 0,11x_2x_3 - 0,097x_4$	
$a = 10,36 - 2,47x_1 + 2,17x_3 - 1,4x_1x_3 + 1,19x_4 - 1,06x_1x_4 +$ $+ 0,76x_2x_4 - 0,70x_3x_4 + 0,65x_2x_3 + 0,41x_1x_2$	
$Ra = 40,8 + 19,1x_1$	
$\delta_{\bar{o}} = 0,0712 + 0,0162x_3 - 0,0075x_2$	
$\gamma_{\bar{л}} = 5,26 + 2,48x_2 + 1,54x_3 + 0,955x_2x_3 - 0,735x_4$	
где: $X_1 \rightarrow I, A$; $X_2 \rightarrow P_{cm}, MPa$; $X_3 \rightarrow F, mm^2$; $X_4 \rightarrow h, mm$	
Биполярный режим, электродная пара «твердый сплав – твердый сплав»	
$M = 1051 + 312x_1 - 115x_3 - 76x_1x_3 - 56x_2$	$x_1 = 0,02(X_1 - 150)$ $x_2 = 5(X_2 - 1)$ $x_3 = 0,00623(X_3 - 560,5)$ $x_4 = 4,44(X_4 - 0,275)$
$M_a = 7,09 - 0,672x_3 - 0,338x_2 - 0,284x_1 - 0,281x_1x_3 - 0,186x_4$	
$a = 4,41 + 0,441x_3 + 0,226x_1 + 0,223x_2 + 0,213x_1x_3 + 0,126x_4$	
$Ra = 17,5 - 3,50x_2 + 1,25x_3 + 0,50x_1 - 0,25x_2x_3$	
$\Delta = 1,46 - 0,93x_4 - 0,309x_3 + 0,127x_1$	
где: $X_1 \rightarrow I, A$; $X_2 \rightarrow P_{cm}, MPa$; $X_3 \rightarrow F, mm^2$; $X_4 \rightarrow f, Гц$	

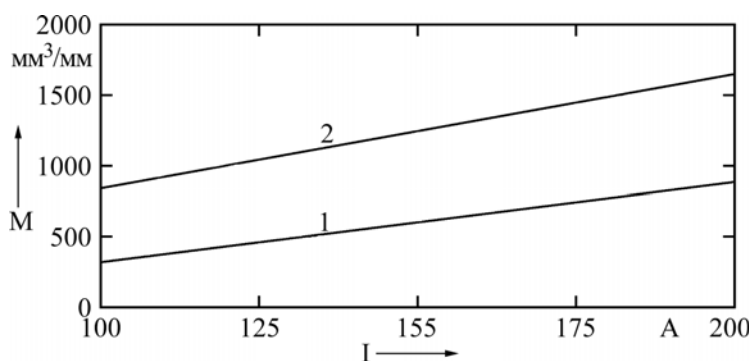


Рис. 1. Зависимость производительности обработки M плоских поверхностей способами РОД от силы тока I : 1 – униполярный режим, электродная пара «графит – твердый сплав»; 2 – биполярный режим, электродная пара «твердый сплав – твердый сплав».

Объектом моделирования были такие технологические характеристики, как: производительность обработки M , mm^3/min ; удельная производительность обработки M_a , $mm^3/A \cdot min$; удельный расход электроэнергии a , kWh/kg ; боковой внешний МЭЗ δ , mm ; относительный линейный износ ЭИ γ , %; шероховатость обработанной поверхности Ra , μm ; относительная неравномерность обработки Δ , %. Кроме того, объектом моделирования были такие физические параметры дуги в условиях биполярного режима РОД, как: плотность тока в дуге j , A/mm^2 ; напряженность электрического поля в столбе дуги E , V/mm ; объемная плотность тепловой мощности в столбе дуги K , kWh/mm^3 .

В качестве факторов использовались сила технологического тока I , частота изменения его полярности f , статическое давление рабочей жидкости P_{cm} на входе потока в МЭЗ, площадь обработки F и глубина обработки h .

В работе для изготовления ЭИ применялся графит марки МПГ-7, а в качестве ЭЗ – твердый сплав ВК-15.

Экспериментальные исследования проводились на электроэрозионном станке модели «Дуга-8Г». Осциллографирование силы униполярного и биполярного тока, напряжения на электродах и статического давления рабочей жидкости на входе потока в МЭЗ осуществлялось с помощью платы АЦП L-264 с частотой преобразования 200 Гц и пакета программного обеспечения «Oscilloskop». Расход рабочей жидкости измерялся расходомером с бесконтактным счетчиком инфракрасных лучевых сигналов в невидимом спектре излучения с длиной волны $\lambda = 1,12 \mu m$. Для металлографических исследований твердого сплава ВК-15 после РОД использовались металлографический микроскоп МИМ-8 и растровый электронный микроскоп модели РЭМ-106И.

Таблица 3. Сравнительный анализ физических параметров электрической дуги и технологических характеристик в условиях униполярного и биполярного режимов РОД

Режим обработки	Схема обработки и распределение электрического поля в дуге	P , Вт	U_{a+k} , В	U_c , В	M , мм ³ /мин	a , кВт·час/кг	$\delta = \delta_{\delta}$, мм
Униполярный		3000	16	14	1020	6,24	0,10
Униполярный		3000	19	11	351	9,99	0,05
Биполярный		3000	23	7	800	3,84	0,03

*Примечание. $I = 100 \text{ A} = \text{const}$; $U = 30 \text{ В} = \text{const}$; $P_{cm} = 0,8 \text{ МПа} = \text{const}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

С целью установления аналитических связей с электрическим и гидравлическим режимами обработки, геометрическими параметрами электродов, а также возможности управления производительностью и точностью обработки, качеством обработанной поверхности и прогнозированием данных параметров получены математические модели технологических характеристик процесса РОД плоских поверхностей образцов из твердого сплава ВК-15 (табл. 2).

С помощью данных математических моделей получены расчетные зависимости производительности обработки M плоских поверхностей способами РОД с применением и без применения электрода-инструмента от силы тока I и выполнен их сравнительный анализ при следующих одинаковых начальных условиях: диапазон изменения силы тока $I = 100\text{--}200 \text{ А}$; площадь обработки $F = 400 \text{ мм}^2$; $P_{cm} = 0,8 \text{ МПа}$ (рис. 1). Для объяснения физических закономерностей биполярного режима процесса РОД плоских поверхностей выполнен сравнительный анализ физических параметров электрической дуги и технологических характеристик (табл. 3).

В процессе РОД плоских поверхностей без применения ЭИ боковой МЭЗ не образуется, а измерить торцевой МЭЗ крайне сложно. Не зная величины торцевого МЭЗ, невозможно активно

управлять скоростью потока на входе в торцевой МЭЗ. Скорость, как известно, зависит от величины торцевого МЭЗ и расхода рабочей жидкости. Управление статическим давлением рабочей жидкости на входе потока в торцевой МЭЗ и расходом жидкости обеспечивает необходимый торцевой МЭЗ, а следовательно, необходимую скорость потока на входе в него. С этой целью получена аналитическая зависимость (1) статического давления P_{cm} органической рабочей жидкости в герметичной камере станка от группы факторов, которые характеризуют геометрические параметры межэлектродного промежутка (МЭП) ($\delta_{m(ax)}$, D), количественные и качественные параметры жидкости (Q , ρ , ν), а также гидравлическое сопротивление на разных участках МЭП (ξ_{ex} , ξ_p), и разработана номограмма (рис. 2):

$$P_{cm} = \frac{\rho Q}{\pi D \delta_{m(ax)}^2} \left\{ \frac{Q}{2\pi D} (\xi_{ex} + 0,25\xi_{\nu_{max}}) + \frac{48\nu}{D^2 \delta_{m(ax)}} a = \sqrt[2]{2D \delta_{m(ax)}^{b=0,5D}} \right. \quad (1)$$

$$\left. \left(r_i - \sqrt{2D \delta_{m(ax)}} \right) \cdot \left(0,5 + \frac{r_i - \sqrt{2D \delta_{m(ax)}}}{D - 2\sqrt{2D \delta_{m(ax)}}} \right)^3 r_i dr \right\}$$

Физический механизм электрической эрозии в условиях биполярного режима процесса РОД двух твердосплавных электродов тесно связан с качеством источников тепла на электродах, полярностью и динамикой процесса.

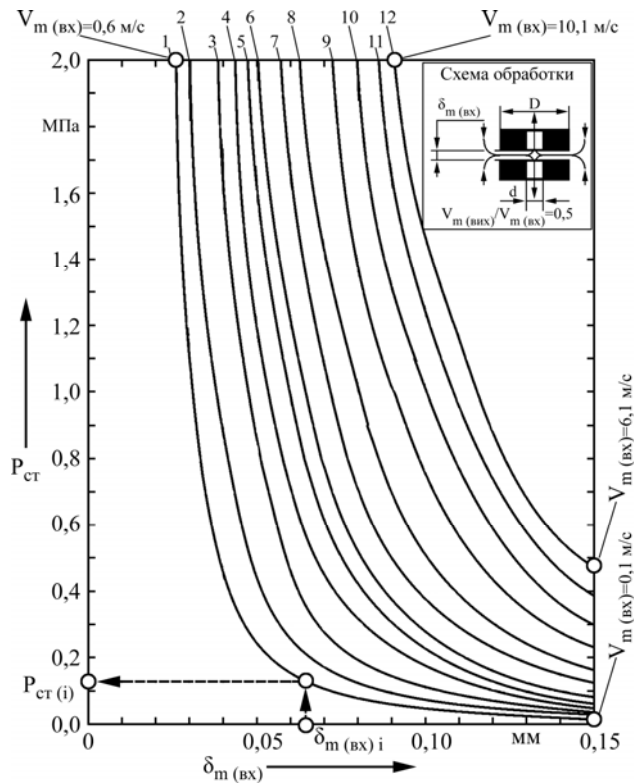


Рис. 2. Номограмма для определения статического давления органической рабочей жидкости $P_{ст}$ в герметичной камере станка при заданных значениях торцевого МЭЗ $\delta_{т(вх)}$ и расхода жидкости Q при РОД пары плоских поверхностей (плотность жидкости $\rho = 875 \text{ кг/м}^3$; кинематическая вязкость $\nu = 9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; внешний диаметр ЭЗ $D = 0,17 \text{ м}$; коэффициент гидравлического сопротивления на входе потока в торцевой зазор $\xi_{вх} = 0,25$; коэффициент гидравлического сопротивления на выходе потока из торцевого зазора $\xi_{вых} = 1,8$). Ключ: $\delta_{т(вх) i} \rightarrow Q_i \rightarrow P_{ст(i)}$; 1 – $Q = 0,5 \text{ л/мин}$; 2 – $Q = 1,0 \text{ л/мин}$; 3 – $Q = 2,0 \text{ л/мин}$; 4 – $Q = 3,0 \text{ л/мин}$; 5 – $Q = 4,0 \text{ л/мин}$; 6 – $Q = 5,0 \text{ л/мин}$; 7 – $Q = 7,0 \text{ л/мин}$; 8 – $Q = 10 \text{ л/мин}$; 9 – $Q = 1,5 \text{ л/мин}$; 10 – $Q = 2,0 \text{ л/мин}$; 11 – $Q = 25 \text{ л/мин}$; 12 – $Q = 30 \text{ л/мин}$.

Таблица 4. Математические модели физических параметров дуги в условиях биполярного режима процесса одновременной РОД двух образцов из твердого сплава ВК-15

Математическая модель	Масштабные соотношения факторов
Плотность тока в дуге: $j_{\delta} = 550,5 - 25x_1 + 168,5x_2 - 62,5x_3$	$x_1 = 0,02(X_1 - 150)$ $x_2 = 5(X_2 - 1)$ $x_3 = 0,00623(X_3 - 560,5)$ $x_4 = 4,44(X_4 - 0,275)$
Напряженность электрического поля в столбе дуги: $E = 638 + 77x_2 - 199x_3$	
Объемная плотность тепловой мощности в столбе дуги: $K = 377 - 35,9x_1 + 148,9x_2 - 151,3x_3$	
где $X_1 \rightarrow I, \text{ А}$; $X_2 \rightarrow P_{ст}, \text{ МПа}$; $X_3 \rightarrow F, \text{ мм}^2$; $X_4 \rightarrow f, \text{ Гц}$	

Качество источников тепла на электродах характеризуется объемной плотностью тепловой мощности в катодном и анодном источниках тепла. В свою очередь объемная плотность тепловой мощности в катодном и анодном источниках тепла определяется плотностью тока и напряженностью электрического поля соответственно в этих областях дуги. Для условий биполярного режима процесса одновременной РОД двух образцов из твердого сплава ВК-15 получены математические модели (табл. 4) и исследовано влияние переменных факторов (рис. 3) на среднюю плотность тока в дуге j_{δ} , напряженность электрического поля в столбе дуги E и объемную плотность тепловой мощности в столбе дуги K .

Для исследования динамики процесса и физического механизма биполярной РОД:

- выполнены фрактографии торцевой поверхности образца из твердого сплава ВК-15 после биполярной РОД (рис. 4);

- выполнены фрактографии одиночных катодных и анодных следов дуги на предварительно шлифованных поверхностях электродной пары «сплав ВК-15 – сплав ВК-15» (рис. 5);

- получены осциллограммы силы тока I , напряжения на электродах U и статического давления рабочей жидкости на входе в МЭЗ $P_{ст}$ (рис. 6);

- выполнен энергетический баланс биполярной электрической дуги в условиях РОД твердосплавной электрической пары (рис. 7).

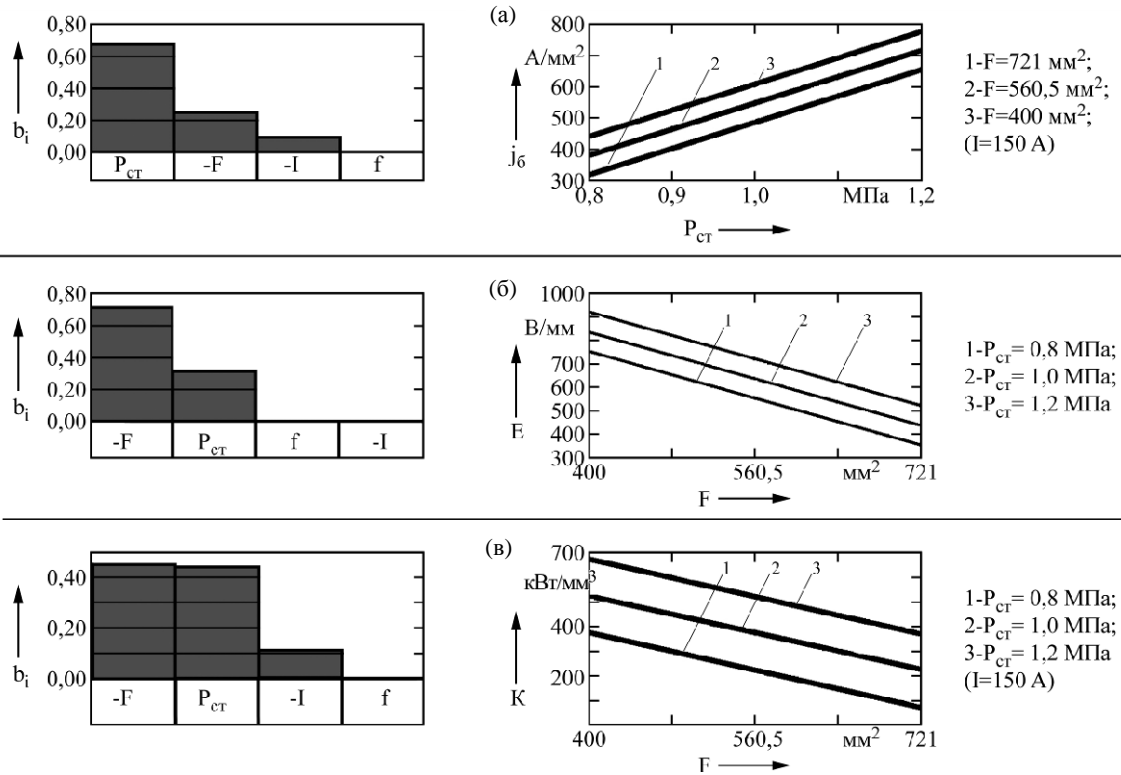


Рис. 3. Степень влияния факторов на физические параметры дуги в условиях биполярного режима процесса одновременной РОД двух образцов из твердого сплава ВК-15: (а) – плотность тока в дуге j_{δ} ; (б) – напряженность электрического поля в столбе дуги E ; (в) – объемная плотность тепловой мощности в столбе дуги K .

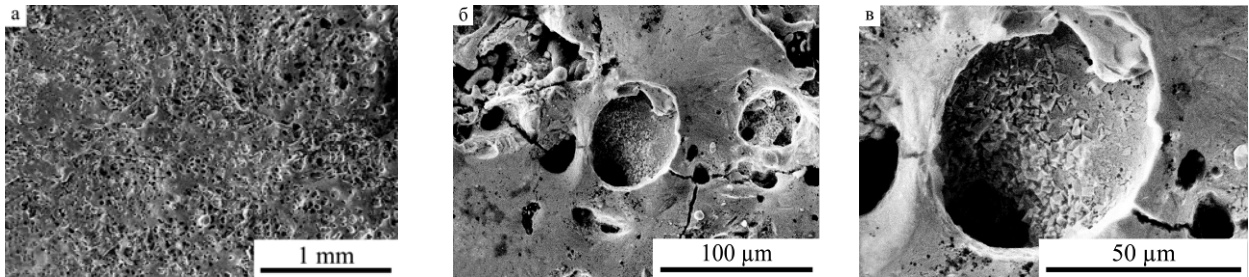


Рис. 4. Фрактографии торцевой поверхности образца из твердого сплава ВК-15 после биполярной РОД ($I = 100$ А; $P_{ст} = 0,8$ МПа; $F = 400$ мм²): (а) – $\times 40$; (б) – $\times 500$; (в) – $\times 1200$.

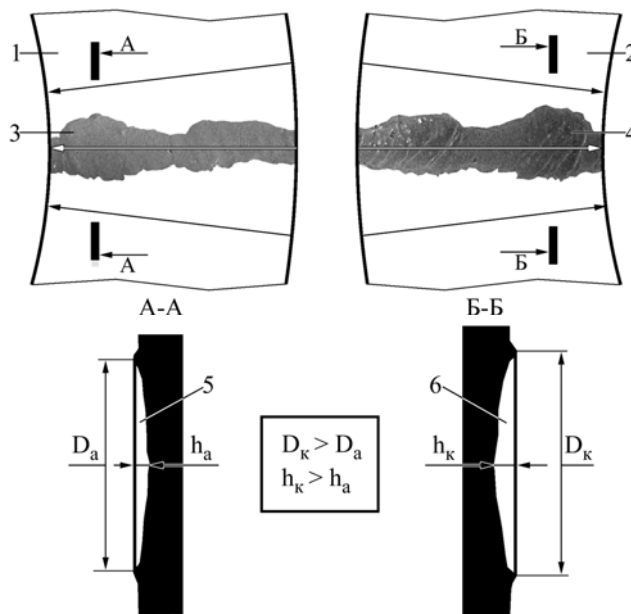


Рис. 5. Фрактографии одиночных следов от горения дуги между электродной парой «сплав ВК-15 – сплав ВК-15»: 1 – анод; 2 – катод; 3 – фрактография анодного следа; 4 – фрактография катодного следа; 5 – профиль анодного следа; 6 – профиль катодного следа.

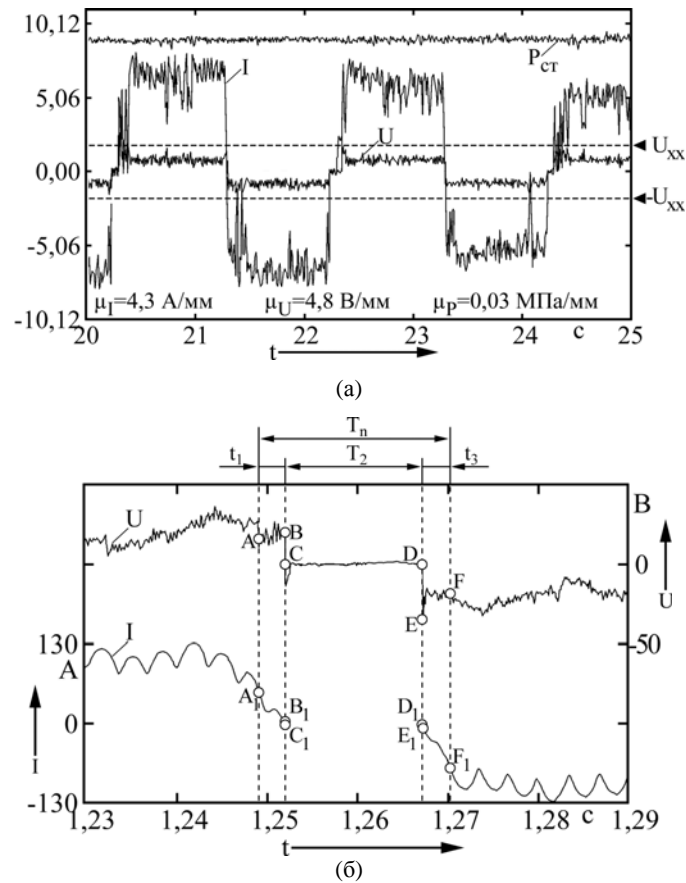


Рис. 6. Типичная осциллограмма (а) и структура переходного процесса биполярной РОД (б) торцевой поверхности электродной пары «сплав ВК-15 – сплав ВК-15» ($I = 100 \text{ А}$; $U = 30 \text{ В}$; $P_{cm} = 0,8 \text{ МПа}$; $F = 400 \text{ мм}^2$).

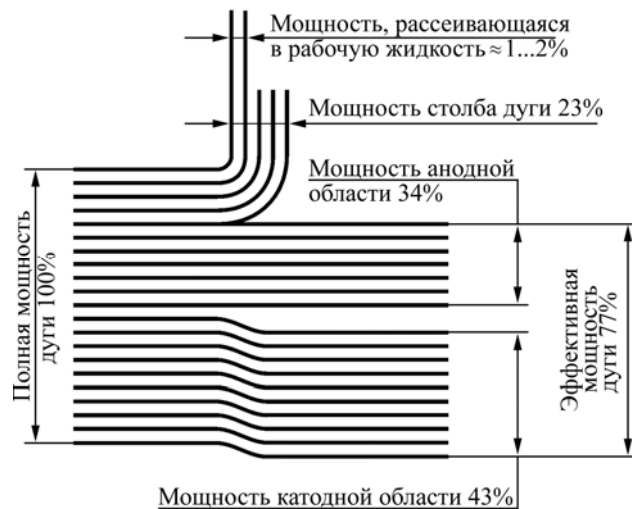


Рис. 7. Энергетический баланс биполярной дуги в условиях РОД.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты сравнительного анализа полученных моделей технологических характеристик процессов РОД твердого сплава ВК-15 в условиях униполярного (с графитовым ЭИ) и биполярного (без ЭИ) режимов (см. табл. 2), который выполнялся при $I = 100 \text{ А}$, $P_{cm} = 1,2 \text{ МПа}$, $F = 400 \text{ мм}^2$, сведены в табл. 5.

Как видим:

– производительность M биполярной РОД, а также удельная производительность M_a значительно (на 230%) превышают производитель-

ность и удельную производительность униполярной РОД. Данное явление наблюдается впервые. Его физический механизм связан с перераспределением энергии в канале электрической дуги и обсуждается ниже;

– удельный расход электроэнергии a биполярной РОД в 2,6 раза меньше по сравнению с удельным расходом электроэнергии униполярной РОД, что положительно характеризует эффективность процесса биполярной РОД плоских поверхностей образцов из твердого сплава ВК-15;

Таблица 5. Результаты сравнительного анализа технологических характеристик процессов униполярной и биполярной РОД торцевых (плоских) поверхностей образцов из твердого сплава ВК-15

Технологические характеристики	Униполярная РОД: пара «графит – сплав ВК-15»	Биполярная РОД: пара «сплав ВК-15 – сплав ВК-15»
M , мм ³ /мин	351	800
M_a , мм ³ /А·мин	3,51	8
A , кВт·год/кг	9,99	3,84
Ra , мкм	$16 \pm 0,5$	$12,5 \pm 0,5$
δ_σ , мм	0,05	0,03
γ , %	1,78	–

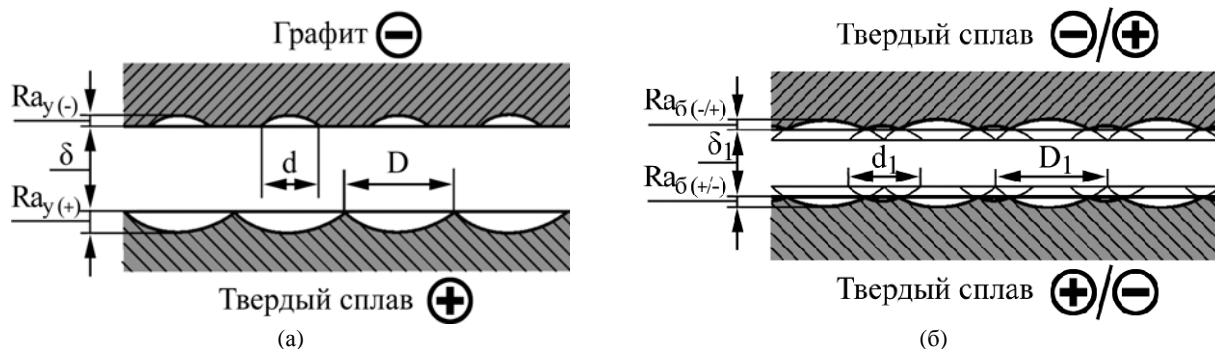


Рис. 8. Физический механизм формирования шероховатости поверхности после униполярной (а) и биполярной РОД (б).

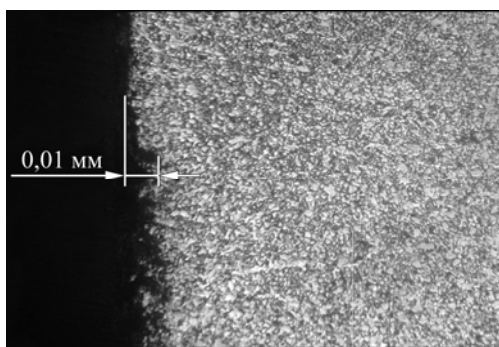


Рис. 9. Микроструктура поверхностного слоя сплава ВК-15 после РОД: ($I = 100$ А; $P_{cm} = 1,2$ МПа; $F = 400$ мм²; $\times 500$).

– шероховатость поверхности Ra после биполярной РОД на 16–27% меньше по сравнению с шероховатостью поверхности после униполярной РОД. Это явление объясняется тем, что поверхность после униполярной РОД формируется только большими катодными лунками (рис. 8а), а поверхность после биполярной РОД – и большими катодными, и малыми анодными лунками (рис. 8б), так как полярность периодически меняется. Микротрещин в поверхностном слое твердосплавного образца после РОД не выявлено (рис. 9);

– выявлено существенное уменьшение (на 40%) торцевого МЭЗ при биполярной РОД по сравнению с униполярной, который оценивался по боковому МЭЗ δ_σ в специальном эксперименте. Как будет показано ниже, это явление приводит к перераспределению энергии между катодной и анодной областями и столбом дуги.

Для объяснения факта значительного повышения производительности процесса при переходе от униполярной РОД твердосплавного образца (электродная пара «графит – сплав

ВК-15») к биполярной РОД (электродная пара «сплав ВК-15 – сплав ВК-15») представим электрическую дугу как сумму трех самостоятельных источников тепла в анодной и катодной областях и в столбе дуги:

$$P = P_a + P_k + P_c \quad (2)$$

где P_a – тепловая мощность анодной области дуги, Вт; P_k – тепловая мощность катодной области дуги, Вт; P_c – тепловая мощность столба дуги, Вт. Источник мощностью P_a , как известно, расположенный в плоском слое на поверхности анода, разрушает анод. Источник мощностью P_k , расположенный в плоском слое на поверхности катода, разрушает катод. А источник мощностью P_c , расположенный по объему столба дуги, отвечает за формирование длины столба дуги или торцевого МЭЗ.

В рамках сравнительного анализа физических параметров электрической дуги и технологических характеристик в условиях униполярного и биполярного режимов РОД (см. табл. 3) эксперименты выполнялись при одинаковой силе

технологического тока ($I = I_{const} = 100$ А). Потому если разделить левую и правую части выражения (2) на I , то получим выражение (3), которое показывает, что тепловая энергия в анодной и катодной областях, а также в столбе дуги пропорциональна падениям напряжения в них:

$$U = U_a + U_k + U_c, \quad (3)$$

где U – напряжение на дуге, В; U_a – падение напряжения в анодной области, В; U_k – падение напряжения в катодной области, В; U_c – падение напряжения в столбе дуги, В.

Из табл. 3 следует, что при переходе от униполярной РОД стали 45 к униполярной РОД твердого сплава ВК-15 наблюдается значительное повышение суммарного падения напряжений в анодной и катодной областях U_{a+k} (с 16 В до 19 В), которое определялось из осциллограмм методом сближения электродов. Это свидетельствует о возрастании падения напряжения в анодной области U_a и об уменьшении падения напряжения в столбе дуги U_c (с 14 В до 11 В), так как падение напряжения в катодной области U_k у них одинаково. В свою очередь, падение напряжения в столбе дуги приводит к уменьшению длины дуги L , а следовательно, торцевого МЭЗ δ , которое, как видим, подтверждается (зазор уменьшается с 0,10 до 0,05 мм). Аналогичным образом наблюдается перераспределение энергии между столбом дуги и катодной областью в пользу катодной области при переходе от униполярной РОД твердого сплава ВК-15 к биполярной РОД двух образцов из этого же сплава: повышается U_{a+k} (с 19 до 23 В) путем увеличения падения напряжения в катодной области U_k за счет уменьшения падения напряжения в столбе дуги U_c (с 11 до 7 В), так как падение напряжения в анодной области U_a у них одинаково; длина дуги уменьшается, что подтверждается уменьшением торцевого МЭЗ (с 0,05 до 0,03 мм).

Таким образом, при переходе от униполярной РОД твердого сплава ВК-15 к биполярной РОД двух образцов из этого же сплава наблюдается существенное увеличение тепловой энергии катодной области за счет энергии столба дуги, которая может превысить тепловую энергию анодной области и вызвать инверсию, то есть изменение направления преобладающей электрической эрозии. Это увеличение тепловой энергии катодной области дуги объясняет увеличение производительности биполярной РОД двух образцов из твердого сплава ВК-15 по сравнению с униполярной.

Полученная аналитическая зависимость (1) статического давления органической рабочей

жидкости в герметичной камере станка от группы факторов и построенная на ее основании номограмма (см. рис. 2) позволяют определить для указанных условий одновременной биполярной РОД твердосплавной пары скрытый от непосредственного наблюдения торцевой МЭЗ. Последний, в свою очередь, позволяет активно управлять скоростью потока, а через нее – технологическими характеристиками, которые отвечают прежде всего за качество обработки.

В результате анализа полученных математических моделей физических параметров дуги в условиях биполярного режима процесса одновременной РОД двух образцов из твердого сплава ВК-15 (табл. 4, рис. 3) установлено, что средняя плотность тока в дуге j_{δ} зависит от гидродинамического фактора P_{cm} (степень влияния – 65,8%), с повышением которого она увеличивается, и от площади обработки F (24,4%), с повышением которой она уменьшается. На напряженность электрического поля в столбе дуги E наибольшее влияние оказывает площадь обработки F (72,1%), с повышением которой она уменьшается, и P_{cm} (27,9%), с повышением которой E уменьшается. Объемная плотность тепловой мощности в столбе дуги K полностью определяется площадью обработки F (45%), с повышением которой K уменьшается, и статическим давлением P_{cm} (44,3%), с повышением которого K увеличивается. В условиях эксперимента напряженность электрического поля в столбе дуги E при биполярной РОД образцов из сплава ВК-15 изменялась в пределах от 353 до 1000 В/мм, что в сотни раз превышает напряженность поля в столбе обычных сварочных и плазменных дуг. Объемная плотность тепловой мощности в столбе дуги K при тех же условиях изменялась в пределах от 99 до 794 кВт/мм³. Оценивание объемной плотности тепловой мощности в катодном и анодном источниках тепла показало, что они отличаются на два порядка: 29700–674900 кВт/мм³ (катодная область) и 297–6749 кВт/мм³ (анодная область).

Установлено, что при реализации процесса биполярной РОД с использованием органической среды первая дуга возбуждается всегда контактным способом на периферийной части образца, а возможность горения дуги в центральной зоне связана с возбуждением ее исключительно продуктами эрозии. На основании этого на рис. 10 показаны последовательность горения дуги в торцевом МЭЗ при формировании единичной лунки, а также влияние продуктов эрозии на процесс РОД всей торцевой поверхности. Так, сначала наблюдается сближение образцов 1, 2 (рис. 10а); дальше (рис. 10б) – «легкий» контакт в месте 3, нагре-

вание, образование газовой полости 4; возбуждение дуги 5, расширение газовой полости (рис. 10в); взрыв дуги, термический выброс жидкой фазы из лунок в поток, затухание дуги, предварительное формирование лунки, расширение газовой полости до максимальных размеров, закипание и выброс дополнительной порции металла из лунок, окончательное формирование лунки, «легкий» электрический контакт валков на новом месте в направлении потока с помощью жидкой и твердой фаз 6 продуктов эрозии, нагревание, образование газовой полости 7 (рис. 10г); возбуждение второй дуги, возможное одновременное инициирование нескольких дуг (рис. 10д).

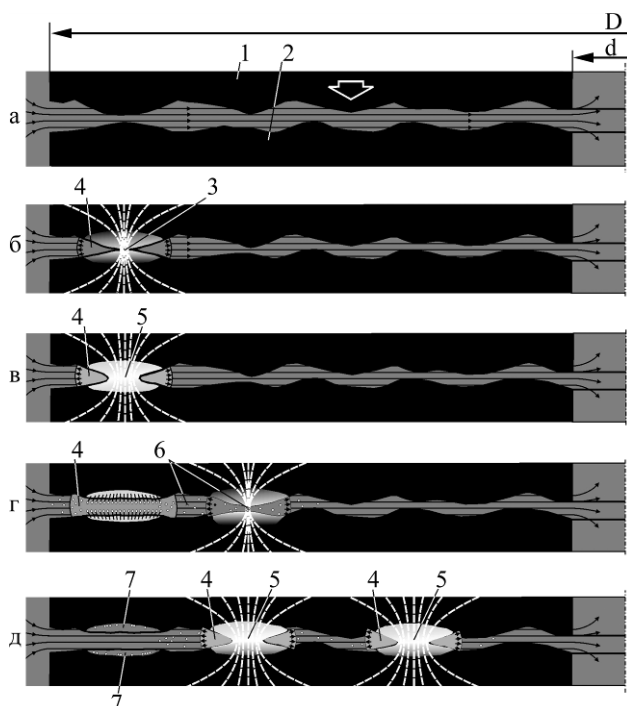


Рис. 10. Последовательность горения дуги в торцевом МЭЗ при биполярной РОД: 1 – верхний подвижный твердосплавный образец; 2 – нижний неподвижный твердосплавный образец; 3 – место контакта; 4 – газовая полость; 5 – электрическая дуга; 6 – продукты эрозии; 7 – единичная лунка.

Форма следа дуги представляет собой электроэрозионную дорожку (см. рис. 5) в направлении течения рабочей жидкости в торцевом МЭЗ, то есть в направлении эвакуации продуктов эрозии. Неравномерная ширина следа свидетельствует о дискретном характере разрушения электродов: дуга находится некоторое время на одном месте, а дальше перемещается на новый участок в соответствии с принципом минимума Г. Штеенбека. Выявлено, что ширина и глубина катодного следа больше соответствующих геометрических параметров анодного следа. Это свидетельствует о том, что тепловая энергия катодной области дуги больше тепловой энергии анодной области.

Из осциллограмм процесса биполярной РОД торцевых поверхностей электродной пары «сплав ВК-15 – сплав ВК-15» (рис. 6а) выявлено, что особенностью биполярной обработки является наличие переходного процесса, связанного с изменением полярности обработки (рис. 6б). Показано, что время переходного процесса T_n не зависит от режима обработки, а определяется конструктивными особенностями контакторного преобразователя. Выполнен структурный анализ времени переходного процесса и определена его продолжительность. Для условий эксперимента время переходного процесса составляет 0,021 с. Это время не превышает 0,21% от периода цикла изменения полярности. Последнее подтверждает тот факт, что частота изменения полярности практически не влияет на производительность процесса биполярной РОД. Но периодическое изменение полярности обеспечивает равномерную обработку припуска на обоих электродах.

С учетом тепловых мощностей приэлектродных областей и столба дуги определен коэффициент полезного действия (кпд) биполярной дуги в поперечном потоке органической среды для электродной пары «сплав ВК-15 – сплав ВК-15». В условиях эксперимента при силе тока $I = 100$ А, рабочего напряжения $U = 30$ В ($U_{a+k} = 23$ В, $U_c = 7$ В), $P_{cm} = 0,8$ МПа, $f = 0,5$ Гц и $F = 400$ мм² кпд составляет 77%. При аналогичных условиях кпд униполярной дуги для электродной пары «графитовый ЭИ – сплав ВК-15» в 2,3 раза меньше и равен 33%, что свидетельствует об экономической целесообразности использования биполярной дуги для РОД твердосплавных деталей.

Установлено, что биполярная электрическая дуга в условиях РОД твердосплавной электродной пары (см. рис. 7) является эффективным источником тепла, так как полезно использует электрическую энергию не только анодной, но и катодной области. Именно поэтому сравнительно с униполярной обработкой образца графитовым ЭИ производительность биполярной РОД возрастает на 230%.

По результатам проведенных исследований предложен, разработан и исследован новый способ высокопроизводительной биполярной обработки труднообрабатываемых материалов электрической дугой в гидродинамическом потоке рабочей жидкости без традиционного применения ЭИ [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый способ высокопроизводительной электродуговой обработки двух одинаковых плоских поверхностей в деталях из труд-

нообрабатываемых материалов в биполярном режиме без традиционного применения электрода-инструмента, который по сравнению со способом электродуговой обработки с применением электрода-инструмента обеспечивает повышение производительности обработки на 230%.

Получены математические модели технологических характеристик процесса униполярной РОД с применением графитового ЭИ и биполярной РОД без применения ЭИ, которые позволяют прогнозировать производительность, точность и качество обработки, а также сравнить между собой эти два способа обработки и выявить преимущества процесса биполярной РОД.

Показано, что физический механизм существенного увеличения производительности процесса РОД (на 230%) при переходе с униполярной (с графитовым ЭИ) к биполярной (без применения ЭИ) обработке связан с инверсией, которая вызвана перераспределением тепловой энергии между катодной областью и столбом дуги в пользу катодной области.

Установлено, что КПД дуги при биполярной РОД достигает 77%, в то время как КПД дуги при униполярной РОД электродной пары «графитовый ЭИ – сплав ВК-15» не превышает 33%. Данный способ является высокоэффективной альтернативой традиционным способам обработки труднообрабатываемых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- Gorbatyuk S.M., Shapoval A.A., Mos'pan D.V., & Dragobetskii V.V. *Steel Transl.* 2016, **46**(7), 474–478. DOI: 10.3103/S096709121607007X.
- Dragobetskii V.V., Shapoval A.A., Mospan D.V., Trotsko O.V. et al. *Metall Min Ind.* 2015, (4), 363–368.
- Dragobetskii V.V., Shapoval A.A., Zagoryanskii V.G. *Steel Transl.* 2015, **45**(1), 33–37. DOI: 10.3103/S0967091215010064.
- Uhlmann E., Domingos D.C. *Procedia CIRP.* 2013, **6**, 180–185. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.102.
- Demellayer R., Richard J. *Procedia CIRP.* 2013, **6**, 89–94. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.030.
- Золотых Б.Н., Круглов А.И. *Проблемы электродуговой обработки материалов.* М.: ЦНИИЛ-электром, 1960. 65–67.
- Meshcheriakov G.N. *Process and Metal Transfer. CIRP Annals.* 1970, **18**, 491–499.
- Klocke F., Klink A., Veselovac D., Keith A.D. et al. *CIRP Annals – Manuf Technol.* 2014, **63**, 703–726.
- Tamura T. *Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM).* 12th, April 2013, Leuven, Belgium. 2013, **6**, 117–122.
- Meshcheriakov G.N., Nosulenko V.I., Meshcheriakov N.G., Bokov V.M. *Process and Metal Transfer. CIRP Annals.* 1988, **37**(1), 209–212.
- Носуленко В.И. *ЭОМ.* 2005, (1), 8–17.
- Боков В.М. *Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою.* Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2002. 300 с.
- Боков В.М., Сіса О.Ф. *Спосіб одночасної розмірної обробки електричною дугою плоских торцевих поверхонь двох деталей.* Україна пат. 45498, 2009. Бюл. № 21.

Поступила 12.03.18

После доработки 18.04.18

Summary

A new method is offered for high-performance dimensional treatment by an electric arc (DTEA) of two similar plane surfaces in the components of hard-for-treatment materials in a bipolar mode without the traditional application of an electrode, which in contrast to the method of DTEA, with the application of an electrode, provides the rise in the efficiency of treatment by 230%. It is shown that while transferring from the unipolar DTEA of the hard alloy BK-15 by the graphite electrode-tool to the bipolar DTEA of two samples of the same alloy, there is a considerable increase of thermal energy of the cathode area due to the energy of the arc column, which can overrun the thermal energy of the anode area and invoke the inversion, that is, the change of the direction of prevailing electric erosion. This increase of the thermal energy of the cathode area of the arc explains the increase of productivity of the bipolar DTEA of the two samples of the hard alloy BK-15 in contrast to the unipolar one.

Keywords: electric arc, hydrodynamic flow, bipolar mode, hard alloy.