

УДК 621.9.048.4; 621.762.5  
doi:10.18720/SPBPU/2/id24-128

С.Н. Григорьев<sup>1</sup>, М.А. Волосова<sup>2</sup>, Я.Р. Мелешкин<sup>1</sup>,  
А. Смирнов<sup>1</sup>, Н.В. Солис Пинарготе<sup>1</sup>

## ПОИСК РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ КЕРАМИКИ СИСТЕМЫ SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ



<sup>1</sup>Сергей Николаевич Григорьев,  
Лаборатория искрового плазменного спекания, Московский  
государственный технологический университет «Станкин»  
Россия, Москва  
Тел.: (499)972-9585, E-mail: [s.grigoriev@stankin.ru](mailto:s.grigoriev@stankin.ru).



<sup>2</sup>Марина Александровна Волосова,  
Кафедра высокоэффективных технологий обработки, Москов-  
ский государственный технологический университет «Станкин»  
Россия, Москва  
Тел.: (499)972-9585, E-mail: [m.volosova@stankin.ru](mailto:m.volosova@stankin.ru).



<sup>1</sup>Ярослав Романович Мелешкин,  
Лаборатория искрового плазменного спекания, Московский  
государственный технологический университет «Станкин»  
Россия, Москва  
Тел.: (499)972-9585, E-mail: [ya.meleshkin@stankin.ru](mailto:ya.meleshkin@stankin.ru).



<sup>1</sup>Антон Смирнов,  
Лаборатория искрового плазменного спекания, Московский  
государственный технологический университет «Станкин»  
Россия, Москва  
Тел.: (499)972-9585, E-mail: [tusluk80@gmail.com](mailto:tusluk80@gmail.com).



<sup>1</sup>Нестор Вашингтон Солис Пинарготе,  
Лаборатория искрового плазменного спекания, Московский  
государственный технологический университет «Станкин»  
Россия, Москва  
Тел.: (499)972-9585, E-mail: [nw.solis@stankin.ru](mailto:nw.solis@stankin.ru).

## Аннотация

Было исследовано влияние параметров электроэрозионной обработки (напряжения в межэлектродном зазоре, длительности импульса, частоты импульсов и скорости перемотки проволоки) на толщину белого слоя и шероховатость поверхности керамического композита SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC, полученного методом искрового плазменного спекания. Для оптимизации параметров электроэрозионной обработки была построена ортогональная матрица Тагути (L9), а также проведен серый реляционный, который дал возможность выявить минимальные значения белого слоя и шероховатости поверхности. Было замечено, что для белого слоя наиболее значимым технологическим параметром является время включения импульса, за которым следовало напряжение искрового промежутка. С другой стороны, частота импульсов и скорость перемотки проволоки не имели существенного значения. Более того, частота импульсов была наиболее важным технологическим параметром, за которой следовали длительность импульса и напряжение в межэлектродном зазоре, в то время как скорость перемотки проволоки оказывала незначительное влияние на шероховатость поверхности. Были установлены оптимальные параметры процесса:  $U = 48$  В,  $T_{\text{он}} = 1,0$  мкс,  $f = 10$  кГц,  $q = 8$  м/мин, при которых получены значения белого слоя и шероховатости поверхности равные 3,16 мкм и 0,847 мкм, соответственно. Эксперимент выявил снижение белого слоя и шероховатости поверхности на 43,67% и 7,12%, соответственно, по сравнению с исходными условиями обработки.

*Ключевые слова:* электроэрозионная обработка, толщина белого слоя, шероховатость поверхности, серый реляционный анализ

## Введение

Благодаря своим выдающимся свойствам керамика, такая как карбид кремния (SiC), диборид титана (TiB<sub>2</sub>) и карбид титана (TiC) широко используется в различных областях машиностроения. Так SiC обладает низким коэффициентом теплового расширения [1] и плотностью, достаточной устойчивостью к тепловому удару [2], высокой теплопроводностью, прочностью [3] и твердостью [4], а также отличной стойкостью к коррозии и окислению. TiC – это сверхвысокотемпературный материал, представляющий огромный интерес благодаря своей термической и химической стабильности, высокой твердости и износостойкости, достаточной электрической и тепловой проводимости и другим свойствам [5]. Высокая тепло- и электропроводность, износостойкость и коррозионная стойкость, а также исключительная твердость, делают TiB<sub>2</sub> перспективным армирующим материалом для керамических композитов.

Керамический композит SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC обладает высокой прочностью на растяжение, и химической стойкостью, а также повышенной коррозионной стойкостью и электропроводностью [6-8]. Все эти свойства делают его перспективным для применения в различных областях промышленности [9-11], в частности для использования в качестве материала для режущего инструмента, поскольку обладает необходимыми свойствами для такого применения [12-14]. Кроме того, добавление TiB<sub>2</sub> в систему SiC-TiC может повысить износостойкость режущего инструмента поскольку TiB<sub>2</sub> при высоких температурах резания преобразуется в диоксид титана (TiO<sub>2</sub>) и оксид бора (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), которые могут выступать в качестве смазки и средства для устранения трещин [5,15,16].

Искровое плазменное спекание (ИПС) является перспективной технологией для уплотнения системы SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC, поскольку в ИПС используются высокие скорости нагрева (от 100°C/мин до 1000°C/мин) вместе с приложением осевого механического усилия [17]. Благодаря этому достигается более быстрое уплотнение за очень короткое время и при более низких температурах, отсутствует рост зерен исходных материалов и получаются материалы с улучшенными механическими свойствами [18,19].

Наиболее широко используемым методом механической обработки керамических материалов в спеченном состоянии является шлифование. Однако, за счет сложности и высокой стоимости данного метода, а также того, что шлифование и другие традиционные методы вызывают износ инструмента во время механической обработки, сколы кромок и повреждения поверхности, что приводит к выходу керамического изделия из строя [20], данный метод не является оптимальным. Для получения более высокой размерной точности и минимальных повреждений поверхности многие ученые исследуют нетрадиционные методы механической обработки керамики, такие как абразивно-струйная обработка [21], лазерная обработка [22] и электроэрозионная обработка [23].

В процессе электроэрозионной обработки материал удаляется из-за расплавления и испарения, которые происходят, когда между обрабатываемым материалом и электродом, погруженным в диэлектрическую среду и находящимся под воздействием электрического напряжения, образуются электрические искры. При уменьшении расстояния между материалом и электродом между ними возникает разряд. Следом за ним вблизи обрабатываемого фронта образуется плазма [24]. Таким образом, при возникновении большого количества искр в зоне разгрузки образуется неглубокий кратер с равномерной эрозией, что обеспечивает лучшую чистоту поверхности и более высокую скорость удаления материала.

Целью данной работы является исследование влияния параметров электроэрозионной обработки (напряжения искрового промежутка, вре-

мени включения импульса, частоты зажигания и скорости вращения проволоки) на толщину белого слоя (ТБС) и шероховатость поверхности (Ra) керамического композита SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC, полученного методом искрового плазменного спекания. Для этой цели была использована оптимизация параметров электроэрозионной обработки с использованием серого реляционного анализа с целью достижения минимальных значений белого слоя и шероховатости поверхности.

## Методы

В исследовании были использованы порошки SiC ( $d_{50} = 0,6$  мкм, чистота 99%), TiB<sub>2</sub> ( $d_{50} = 0,9$  мкм, чистота 99,9%) и TiC ( $d_{50} = 0,5$  мкм, чистота 99,5%), произведенные ООО «Плазмотерм», Россия. Спеченные композиты были получены из смеси порошков SiC (60 об.%), TiB<sub>2</sub> (25 об.%) и TiC (15 об.%).

Данные порошки измельчали в шаровой мельнице и смешивали в изопропанолу в течение 36 часов с использованием шариков SiC (Ø3 мм) в полиэтиленовой банке. Массовое соотношение порошка к шарикам и порошка к изопропанолу составляло 1:3 и 1:1 соответственно. Полученную влажную порошковую смесь высушивали в вакууме в течение 12 часов при температуре 80°C. Затем сухие порошки измельчали в агатовой ступке и просеивали через сито.

Далее на установке искрового плазменного спекания H-HP D 25 SD фирмы FCT Systeme GmbH (Рауэнштайн, Германия) были получены спеченные композиты (Ø20мм, h=6мм). В начале спекания при комнатной температуре применялось давление 43 МПа до 300°C. Затем давление и температура повышались до 1770°C и 80 МПа соответственно, скорость нагрева составляла 100°C/мин. После достижения температуры 1770°C скорость нагрева была снижена до 25°C/мин, для достижения температуры спекания в 1870°C, которая поддерживалась в течение 10 минут. По окончании нагрева образцы охлаждались естественным путем в камере спекания.

Перед проведением электроэрозионной обработки спеченные образцы были отполированы с обеих сторон в соответствии с традиционной технологией полировки. Эксперименты проводились на установке Arta 123 (Delta Test, Фрязино, Россия). В качестве диэлектрической среды использовали деионизированную воду, а электродом служила латунная проволока (Ø0,25мм) SuperBrass (НРК, Н.Новгород, Россия).

В таблице 1 приведены уровни всех выбранных переменных факторов процесса электроэрозионной обработки. Нижние и верхние уровни параметров, указанные в таблице 1, были выбраны в ходе пробного эксперимента. Эксперимент был разработан с учетом количества уровней и степеней свободы для каждого параметра процесса.

**Таблица 1.** Значения переменных параметров процесса электроэрозионной обработки

Фактор (ед.)		Уровни		
		1	2	3
Напряжение в межэлектродном зазоре (В)	U	48	60	72
длительности импульса (мс)	T <sub>on</sub>	1	1.5	2
Частота импульсов (кГц)	f	10	15	20
Скорость перемотки проволоки (м/мин)	q	4	6	8

Таким образом, для четырех переменных была построена ортогональная матрица Тагути (L9), причем каждый переменный параметр имел три уровня. Электроэрозионную обработку выполняли на расстоянии 5 мм во время каждого эксперимента, и каждый из них повторяли 3 раза [25]. В этом исследовании в качестве параметров реакции рассматривались толщина белого слоя и средняя шероховатость поверхности композита SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC. Шероховатость поверхности измеряли с помощью профилометра Hommel-Tester T8000 (Hommel Werke, Германия) в единицах Ra (мкм). Для анализа было взято среднее из трех значений шероховатости поверхности.

Анализ толщины белого слоя проводился в соответствии с методологией, использованной Бисарией [26]. В настоящей работе изображение белого слоя было получено с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Phenom ProX (ThermoFisher Scientific, США). Затем оно было импортировано в программное обеспечение JMicroVision для измерения площади и длины белого слоя. После этого была рассчитана ТБС с использованием уравнения:

$$\text{ТБС} = S_{\text{БС}}/L_{\text{БС}} \quad (1)$$

где  $S_{\text{БС}}$  – площадь белого слоя,  $L_{\text{БС}}$  – длина белого слоя.

Серый реляционный анализ (СРА) – популярный метод оптимизации в технологическом инжиниринге, разработанный Денгом [27] с целью определения оптимальной комбинации параметров процесса с использованием преобразования нескольких откликов в одну серую реляционную оценку (СРО). СРА использует специфическую кодификацию информации, например, конкретная и достоверная информация представляется как белое, в то время как неизвестная информация представляется как черное. Однако существуют экспериментальные случаи с неполной информацией, т.е. между черным и белым, которые могут быть представлены в виде серого. В СРА процесс, который нормализует параметры отклика от нуля до единицы, называется нормализацией. На основе нормализованных данных рассчитывается серый реляционный коэффициент (СРК). Тогда СРА – это среднее значение серых реляционных коэффициентов для параметров отклика, представляющий уровень корреляции между эталонной (идеальной) последовательностью и последовательностью сопоставимости [28], в которой

идеальная последовательность представляет наилучшую производительность, которая может быть достигнута любым из параметров последовательности сопоставимости. Следовательно, если последовательность сопоставимости для альтернативы получает наивысшую серую реляционную оценку с эталонной последовательностью, это означает, что последовательность сопоставимости наиболее похожа на эталонную (идеальную) последовательность, и эта альтернатива была бы лучшим выбором [29-31]. Таким образом, общая характеристика производительности зависит от серого реляционного уровня, и это есть целевая функция.

Параметры экспериментального отклика нормализуются в диапазоне от 0 до 1 в зависимости от характеристики качества каждого из них. Существует 3 типа характеристик качества: чем выше, тем лучше, чем ниже, тем лучше и желаемое значение [32]. В этом исследовании параметры отклика – толщина белого слоя и шероховатость поверхности относятся к типу качества “чем ниже, тем лучше”. Таким образом, их нормализованные значения будут рассчитаны по уравнению (2):

$$V_i^*(m) = (\max V_i(m) - V_i(m)) / (\max V_i(m) - \min V_i(m)), \quad (2)$$

где  $V_i^*(m)$  – нормализованное значение ( $V_i^*(m) \in [0,1]$ ),  $\max V_i(m)$  – максимальное экспериментальное значение,  $\min V_i(m)$  – минимальное экспериментальное значение,  $V_i(m)$  – нормализуемое экспериментальное значение,  $i$  – число экспериментальных объектов, а  $m$  – параметр отклика.

Отклонение рассчитывается с помощью уравнения (3):

$$\Delta_{0i}(m) = |V_0^*(m) - V_i^*(m)|, \quad (3)$$

где  $\Delta_{0i}(m)$  – отклонение ( $\Delta_{0i}(m) \in [0,1]$ ),  $V_i^*(m)$  – нормализованное значение, подлежащее анализу,  $V_0^*(m)$  – контрольное значение, равное максимальному из нормализованных значений.

Серый реляционный коэффициент рассчитывается по уравнению (4):

$$CRK_i(m) = [\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}] / [\Delta_{0i}(m) + \xi \Delta_{\max}], \quad (4)$$

где  $\Delta_{\min}$  – минимальное значение отклонения среди  $\Delta_{0i}(m)$ ,  $\Delta_{\max}$  – максимальное значение отклонения среди  $\Delta_{0i}(m)$ ,  $\xi$  – отличительный коэффициент [0-1], который обычно равен 0,5, для присвоения равных значений каждому параметру [33].  $CRK_i(m) \approx [0,1]$ .

Серая реляционная оценка – это среднее значение всех серых реляционных коэффициентов, рассчитанных по уравнению (4), в каждом  $i$ -м эксперименте, рассчитываемое по уравнению (5):

$$CPO_i(m) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n CRK_i(m), \quad (5)$$

где  $i$  – количество экспериментальных критериев,  $n$  – количество параметров отклика.  $CPO_i \in [0,1]$ .

## Результаты и обсуждение

В таблице 2 приведены экспериментальные значения толщины белого слоя и шероховатости поверхности в виде ортогональной матрицы Тагути (L9).

Таблица 2. Ортогональная матрица Тагути (L9) с экспериментальными откликами

№ опыта	Параметры процесса				Параметры отклика	
	U (В)	T <sub>он</sub> (мс)	f (кГц)	q (м/мин)	ТБС (мкм)	Ra (мкм)
1	48	1.0	10	4	3.35	0.883
2	48	1.5	15	6	3.61	0.982
3	48	2.0	20	8	5.87	1.181
4	60	1.0	15	8	3.56	0.900
5	60	1.5	20	4	4.77	1.152
6	60	2.0	10	6	6.21	0.935
7	72	1.0	20	6	4.41	0.928
8	72	1.5	10	8	6.16	0.794
9	72	2.0	15	4	6.42	0.973

Полученные результаты для параметров отклика – белого слоя и шероховатости поверхности были нормализованы с использованием уравнения (2). После этого было рассчитано отклонение каждого параметра отклика при помощи уравнения (3). Затем был рассчитан серый реляционный коэффициент с использованием уравнения (4). В данном уравнении коэффициент  $\xi$  рассматривался как равный 0,5. Затем была оценена серая реляционная оценка с использованием уравнения (5) и рассчитанной СРО для толщины белого слоя и шероховатости поверхности.

Таблица 3. Серый реляционный анализ

№ опыта	Нормализованные		Отклонения		СРК		СРО	Ранг
	ТБС	Ra	ТБС	Ra	ТБС	Ra		
1	1.0000	0.7700	0.0000	0.2300	1.0000	0.6850	0.8425	1
2	0.9153	0.5142	0.0847	0.4858	0.8552	0.5072	0.6812	3
3	0.1792	0.0000	0.8208	1.0000	0.3785	0.3333	0.3559	9
4	0.9316	0.7261	0.0684	0.2739	0.8797	0.6461	0.7629	2
5	0.5375	0.0749	0.4625	0.9251	0.5195	0.3509	0.4352	7
6	0.0684	0.6305	0.9316	0.3695	0.3493	0.5750	0.4621	6
7	0.6547	0.6537	0.3453	0.3463	0.5915	0.5908	0.5912	5
8	0.0847	1.0000	0.9153	0.0000	0.3533	1.0000	0.6766	4
9	0.0000	0.5375	1.0000	0.4625	0.3333	0.5195	0.4264	8

Ранг каждого эксперимента, основанный на значении СРО, приведен в таблице 3. Здесь можно отметить, что эксперимент 1 показывает самое высокое значение СРО. Это означает, что эксперимент 1 показал лучшие

результаты откликов среди девяти проведенных экспериментов. 2-е и 3-е места занимают эксперименты 4 и 2 соответственно.

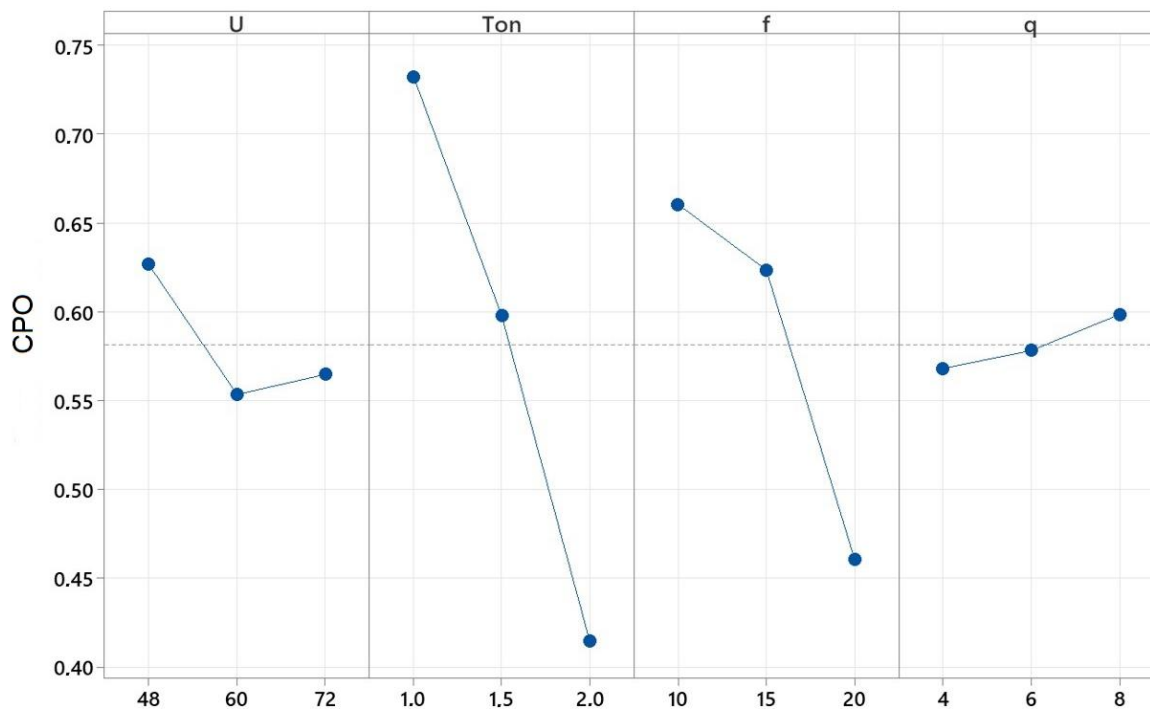
В таблице 4 приведены сведенные в таблицу отклики на средние значения серой реляционной оценки, рассчитанные для трех уровней переменных факторов процесса. Из таблицы видно, что максимальное значение СРО напряжения в межэлектродном зазоре, длительности импульса, частоты импульсов и скорости перемотки проволоки соответствует уровням 1, 1, 1 и 3 соответственно.

Таким образом было определено оптимальное сочетание технологических параметров для минимальных значений толщины белого слоя и шероховатости поверхности:  $U = 48$ ,  $T_{on} = 1,0$  мкс,  $f = 10$  кГц;  $q = 8$  м/мин.

**Таблица 4.** Отклик для средней СРО

Уровень	U	T <sub>on</sub>	f	q
1	0.6265	0.7322	0.6604	0.5680
2	0.5534	0.5977	0.6235	0.5782
3	0.5647	0.4148	0.4608	0.5985
Разница	0.0731	0.3174	0.1996	0.0304
Ранг	3	1	2	4

На рис. 1 показаны графики основных параметров для СРО, которые описывают влияние на нее параметров процесса. Здесь пунктирная линия представляет значение, соответствующее общему среднему значению СРО.



**Рис. 1.** Графики основных параметров для СРО



После определения оптимального сочетания технологических параметров были проведены эксперименты для прогнозирования. Таким образом, предсказанные результаты были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при оптимальном сочетании технологических параметров. Прогнозируемая СРО ( $\eta$ ) была рассчитана по уравнению (6) при оптимальном сочетании параметров процесса [33, 34].

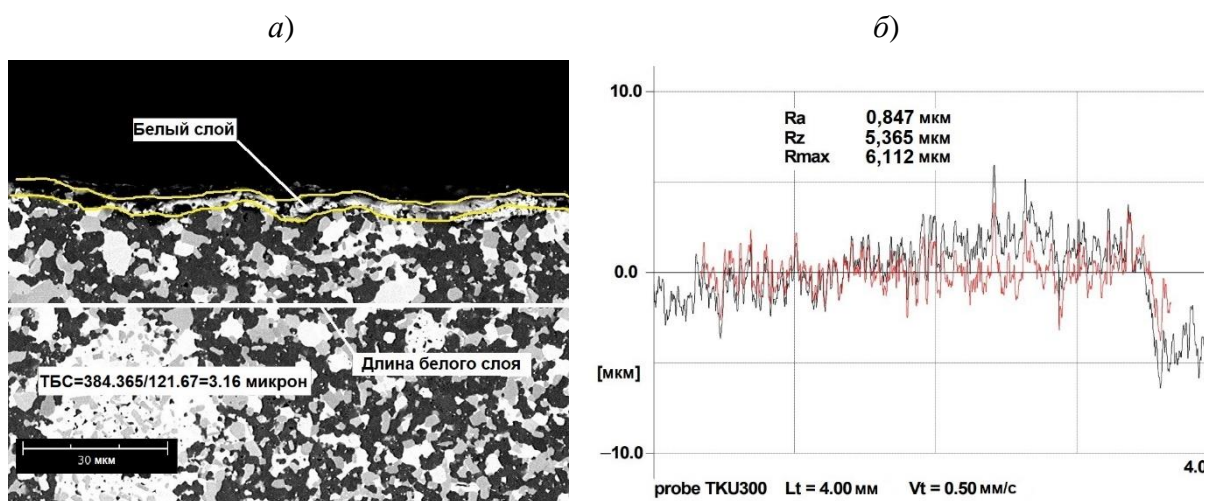
$$CPO(\eta) = \eta_m + \sum_{i=1}^p (\eta_i - \eta_m), \quad (6)$$

где  $\eta_m$  – общее среднее значение СРО,  $\eta_i$  – максимальное среднее значение СРО при оптимальном уровне параметров процесса,  $p$  – количество параметров процесса, влияющих на реакцию,  $= 4$ .

В этом исследовании  $\eta_m = 0,5816$ ,  $p = 4$ ,  $\eta_i (U) = 0,6265$ ,  $\eta_i (T_{on}) = 0,7322$ ,  $\eta_i (f) = 0,6604$ ,  $\eta_i (q) = 0,5985$ . Таким образом, прогнозируемое значение СРО ( $\eta$ ) равно:

$$CPO(\eta) = 0.5816 + (0.6265 - 0.5816) + (0.7322 - 0.5816) + (0.6604 - 0.5816) + (0.5985 - 0.5816) = 0.8729.$$

На рис. 2 показаны СЭМ-изображение поверхности, полученной с использованием оптимизированных параметров, и ее соответствующий профиль.



**Рис. 2.** Экспериментальный оптимальный процесс ( $U = 48$ ,  $T_{on} = 1.0$ ,  $f = 10$ ,  $q = 8$ ):  
а) СЭМ-изображение ТБС; б) график Ra.

В таблице 5 приведены значения отклика при оптимальном сочетании технологических параметров и начальные параметры процесса. В СРА значения СРО, близкие к средней линии графика основного эффекта, являются начальными параметрами процесса, рис. 1. В таблице 5 видно, что значение ТБС было уменьшено с 5,61 мкм до 3,16 мкм, а Ra – с 0,912 мкм до 0,847 мкм. Кроме того, замечено, что экспериментальные результаты согласуются с прогнозируемыми значениями, показывая увеличение СРО на 0,2756.

Таблица 5. Подтверждающий тест

Параметры	Параметры процесса	Оптимальные параметры процесса	
		Прогнозируемые	Экспериментальные
Уровень комбинирования	$(U)_3(T_{on})_2(f)_2(q)_2$	$(U)_1(T_{on})_1(f)_1(q)_3$	$(U)_1(T_{on})_1(f)_1(q)_3$
ТБС	5.61	3.31	3.16
Ra	0.912	0.836	0.847
СРО	0.6194	0.8729	0.8925
Улучшение в СРО = $0.8925 - 0.6194 = 0.2756$			

## Заключение

В этой работе был изучен процесс электроэрозионной обработки керамического композита SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC. Для этого была использована ортогональная матрица Тагути (L9). Кроме того, было изучено влияние параметров процесса на параметры отклика ТБС и Ra, определено какие параметры процесса были существенными для каждого из параметров отклика. Для определения сочетания оптимальных технологических параметров для достижения меньшей ТБС и Ra был использован серый реляционный анализ.

В целом, можно сделать следующие выводы:

- В качестве наиболее значимого параметра процесса для ТБС была выбрана длительность импульса, за которой следует напряжение в межэлектродном зазоре. Частота импульсов и скорость перемотки проволоки не имели существенного значения для ТБС. Тенденция к увеличению ТБС наблюдалась при увеличении напряжения в межэлектродном зазоре и длительности импульса с 48 до 72 В и с 1,0 до 2,0 мкс соответственно. Кроме того, было отмечено, что частота импульсов и скорость перемотки проволоки оказывают неоднозначное влияние. С увеличением частоты импульсов с 10 до 15 кГц и скорости перемотки проволоки с 4 до 6 м/мин наблюдалось снижение ТБС. С другой стороны, когда частота импульсов и скорость перемотки проволоки увеличились с 15 до 20 кГц и с 6 до 8 м/мин соответственно, было замечено увеличение ТБС;

- Что касается Ra, то наиболее важным параметром была выбрана частота импульсов, за которой следовали длительность импульсов и напряжение в межэлектродном зазоре. Скорость перемотки проволоки не имела существенного значения для Ra. Наблюдалось уменьшение Ra с увеличением напряжения. Более того, было замечено уменьшение Ra с уменьшением длительности и частоты импульсов. При увеличении скорости перемотки проволоки с 4 до 6 м/мин Ra уменьшается с 1,00 до 0,95 мкм. Дальнейшее увеличение скорости приводит к небольшому увеличению Ra с 0,95 до 0,96 мкм;

- Параметры ТБС 3,16 мкм и Ra = 0,847 мкм были получены при оптимальных параметрах процесса ( $U = 48$  В;  $T_{\text{он}} = 1,0$  мкс;  $f = 10$  кГц;  $q = 8$  м/мин). ТБС равная 3,16 мкм, была самой малой из полученных значений.

- Эксперимент показал, что по сравнению с исходными условиями обработки электроэрозионная обработка при оптимальных технологических параметрах демонстрирует снижение ТБС и Ra на 43,67% и 7,12% соответственно.

***Исследование выполнено за счет средств государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFS-2023-0003).***

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Chen, J., Li, W., Jiang, W. Characterization of sintered TiC-SiC composites. *Ceram. Int.*, 2009, 35, pp. 3125–3129.
- [2] Cho, K.-S., Kim, Y.-W., Choi, H.-J., Lee, J.-G. SiC-TiC and SiC-TiB<sub>2</sub> composites densified by liquid-phase sintering. *J. Mater. Sci.*, 1996, 31, pp. 6223–6228.
- [3] Shaffer, P.T.B. The SiC phase in the system SiC-B<sub>4</sub>C-C. *Mater. Res. Bull.* 1969, 4, pp. 213–219.
- [4] Lee, S.-K., Ishida, W., Lee, S.-Y., Nam, K.-W., Ando, K. Crack-healing behavior and resultant strength properties of silicon carbide ceramic. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2005, 25, pp. 569–576.
- [5] Grigoriev, S.N., Pristinский, Y., Soe, T.N., Malakhinsky, A., Mosyanov, M., Podrabinnik, P., Smirnov, A., Solís Pinargote, N.W. Processing and Characterization of Spark Plasma Sintered SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC Powders. *Materials*, 2022, 15, p.1946.
- [6] Song, Y.L., Pan, C.Z., Zhang, J., Zhu, B. TiB<sub>2</sub>-TiC-SiC composites prepared through high-gravity field activated SHS. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, 382, 022048.
- [7] Li, W.-J., Tu, R., Goto, T. Preparation of TiC-TiB<sub>2</sub>-SiC Ternary Eutectic Composites by Arc-Melting and Their Characterizations. *Mater. Trans.* 2006, 47, pp. 1193–1197.
- [8] Mestral, F., Thevenot, F. Ceramic composites: TiB<sub>2</sub>-TiC-SiC. Part I Properties and microstructures in the ternary system. *J. Mater. Sci.*, 1991, 26, pp. 5547–5560.
- [9] Somiya, S. *Handbook of Advanced Ceramics. Materials, Applications, Processing, and Properties*, 2nd ed.; Somiya, S., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2013.
- [10] Grigoriev, S., Vereschaka, A., Milovich, F., Tabakov, V., Sitnikov, N., Andreev, N., Sviridova, T., Bublikov, J. Investigation of multicomponent

- nanolayer coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb, and Al. *Surf. Coat. Technol.*, 2020, 401, 126258.
- [11] Vereschaka, A.S., Grigoriev, S.N., Sotova, E.S., Vereschaka, A.A. Improving the efficiency of the cutting tools made of mixed ceramics by applying modifying nano-scale multilayered coatings. *Adv. Mat. Res.*, 2013, 712-715, pp. 391-394.
- [12] Akhtar, S.S. A critical review on self-lubricating ceramic-composite cutting tools. *Ceram. Int.*, 2021, 47, pp. 20745–20767.
- [13] Wäsche, R., Klaffke, D. In situ formation of tribologically effective oxide interfaces in SiC-based ceramics during dry oscillating sliding. *Tribol. Lett.*, 1998, 5, pp. 173–190.
- [14] Wäsche, R., Yarim, R., Klaffke, D., Hartelt, M. Oscillating sliding wear behaviour of SiC, TiC, TiB<sub>2</sub>, 59SiC-41TiB<sub>2</sub> and 52SiC-24TiC-24TiB<sub>2</sub> materials up to 750 °C in air. *Tribotest*, 2006, 12, pp. 99–111.
- [15] Fattahi, M., Pazhouhanfar, Y., Delbari, S.A., Shaddel, S., Sabahi Namini, A., Shahedi Asl, M. Influence of TiB<sub>2</sub> content on the properties of TiC-SiCw composites. *Ceram. Int.*, 2019, 46, pp. 7403–7412.
- [16] Shahedi Asl, M., Delbari, S. A., Shayesteh, F., Ahmadi, Z., Motallebzadeh, A. Reactive Spark plasma sintering of TiB<sub>2</sub>–SiC–TiN novel composite. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 81, pp. 119–126.
- [17] Gutiérrez-González, C.F., Pozhidaev, S., Rivera, S., Peretyagin, P., Solís, W., Díaz, L.A., Fernández, A., Torrecillas, R. Longer-lasting Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiCw-TiC cutting tools obtained by Spark plasma sintering. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2017, 14, pp. 367–373.
- [18] Pristiniski, Y., Pinargote, N.W.S., Smirnov, A. The effect of MgO addition on the microstructure and mechanical properties of alumina ceramic obtained by Spark plasma sintering. *Mater. Today Proc.*, 2019, 19, pp. 1990–1993.
- [19] Pristiniski, Y., Pinargote, N.W.S., Smirnov, A. Spark plasma and conventional sintering of ZrO<sub>2</sub>-TiN composites: A comparative study on the microstructure and mechanical properties. *MATEC Web Conf.*, 2018, 224, 01055.
- [20] Sharma, A., Babbar, A., Tian, Y. et al. Machining of ceramic materials: a state-of-the-art review. *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, 2022.
- [21] Schüler M., Herrig T., Bergs T. A study on abrasive waterjet multi-stage machining of ceramics. *Procedia CIRP*, 2022, 108, pp. 770-775.
- [22] Ma, Z., Wang, Q., Liang, Y., Cui, Z., Meng, F., Chen, L., Wang, Z., Yu, T., Liu, C. The mechanism and machinability of laser-assisted machining zirconia ceramics. *Cer. Int.*, 2023, 49 (11-A), pp. 16971-16984.
- [23] Grigoriev, S.N., Nadykto, A.B., Volosova, M.A., Zelensky, A.A., Pivkin, P.M. WEDM as a Replacement for Grinding in Machining Ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC Cutting Inserts. *Metals.*, 2021, 11, p. 882.

- [24] Grigoriev, S.N., Hamdy, K., Volosova, M.A., Okunkova, A.A., Fedorov, S.V. Electrical discharge machining of oxide and nitride ceramics: A review. *Mater. Des.* 2021, 209, p. 109965.
- [25] Bains, P.S., Sidhu, S.S., Payal, H.S., Kaur, S. Magnetic Field Influence on Surface Modifications in Powder Mixed EDM. *Silicon*, 2019, 11, pp. 415–423.
- [26] Bisaria, H., Shandilya, P. The machining characteristics and surface integrity of Ni-rich NiTi shape memory alloy using wire electric discharge machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* 2019, 233(3), pp. 1068-1078.
- [27] Singh, S., Yeh, M.F. Optimization of Abrasive Powder Mixed EDM of Aluminum Matrix Composites with Multiple Responses Using Gray Relational Analysis. *J. Mater. Eng. Perform.* 2012, 21, pp. 481–491.
- [28] Kuo, Y., Yang, T., & Huang, G.-W. The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 55(1), pp. 80–93.
- [29] Girish, B. M., Siddesh, H. S., & Satish, B. M. Taguchi grey relational analysis for parametric optimization of severe plastic deformation process. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(8).
- [30] Deng, J., Yan, Q., Lu, J., Xiong, Q., Pan, J. Optimisation of Lapping Process Parameters for Single-Crystal 4H–SiC Using Orthogonal Experiments and Grey Relational Analysis. *Micromachines* 2021, 12, p.910.
- [31] Suresh Kumar, S., Uthayakumar, M., Thirumalai Kumaran, S., Parameswaran, P., Mohandas, E., Kempulraj, G., Ramesh Babu, B.S., Natarajan, S. A. Parametric optimization of wire electrical discharge machining on aluminium based composites through. grey relational analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 20, pp. 33–39.
- [32] Huang, J. T., Liao, Y. S. Optimization of machining parameters of Wire-EDM based on Grey relational and statistical analyses. *International Journal of Production Research*, 2003, 41(8), pp. 1707–1720.
- [33] Sylajakumari, P.A., Ramakrishnasamy, R., Palaniappan, G. Taguchi grey relational analysis for multi-response optimization of wear in co-continuous composite. *Materials* 2018, 11, p. 1743.
- [34] Bisaria, H., Shandilya, P. The machining characteristics and surface integrity of Ni-rich NiTi shape memory alloy using wire electric discharge machining. *Proc IMechE Part C: J. Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(3) pp. 1068–1078.

## OPTIMIZATION OF WEDM PARAMETERS FOR CERAMICS OF SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC SYSTEM OBTAINED BY SPARK PLASMA SINTERING

<sup>1</sup>Laboratory of Electric Current Assisted Sintering Technologies, Moscow State University of Technology “STANKIN”

<sup>2</sup>Department of High-Efficiency Machining Technologies, Moscow State University of Technology “STANKIN”

### Abstract

The influence of WEDM parameters (Spark gap voltage, Pulse-on time, Spark frequency, and Wire speed) on the recast layer thickness and surface roughness of Spark Plasma Sintered SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC ceramic composite was investigated. For this, an orthogonal L9 Taguchi design was used, and the Grey relational analysis was carried out to multi-response WEDM parameters optimization in order to determine the minimum recast layer thickness and surface roughness. It was noticed that for recast layer thickness the Pulse-on time was observed as the most significant process parameter, followed by Spark gap voltage. On the other hand, Spark frequency and Wire speed had no significance for recast layer thickness. Moreover, Spark frequency was observed as the most significant process parameter, followed by Pulse-on time and Spark gap voltage, while Wire speed had a negligible effect for surface roughness. It was found, that at optimum process parameters ( $U = 48\text{V}$ ;  $T_{on} = 1.0\ \mu\text{s}$ ;  $f = 10\ \text{kHz}$ ;  $q = 8\ \text{m/min}$ ) were obtained a recast layer thickness of  $3.16\ \mu\text{m}$  and surface roughness of  $R_a = 0.847\ \mu\text{m}$ . The confirmation test showed a decrease in recast layer thickness and surface roughness by 43.67% and 7.12%, respectively, in comparison to the initial machining condition.

*Key words: WEDM, recast layer thickness, surface roughness, Grey relational analysis*

### REFERENCES

- [1] Chen, J., Li, W., Jiang, W. Characterization of sintered TiC-SiC composites. *Ceram. Int.* 2009, 35, pp. 3125–3129.
- [2] Cho, K.-S., Kim, Y.-W., Choi, H.-J., Lee, J.-G. SiC-TiC and SiC-TiB<sub>2</sub> composites densified by liquid-phase sintering. *J. Mater. Sci.* 1996, 31, pp. 6223–6228.
- [3] Shaffer, P.T.B. The SiC phase in the system SiC-B<sub>4</sub>C-C. *Mater. Res. Bull.* 1969, 4, pp. 213–219.

- [4] Lee, S.-K., Ishida, W., Lee, S.-Y., Nam, K.-W., Ando, K. Crack-healing behavior and resultant strength properties of silicon carbide ceramic. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2005, 25, pp. 569–576.
- [5] Grigoriev, S.N., Pristinitskiy, Y., Soe, T.N., Malakhinsky, A., Mosyanov, M., Podrabinnik, P, Smirnov, A., Solís Pinargote, N.W. Processing and Characterization of Spark Plasma Sintered SiC-TiB<sub>2</sub>-TiC Powders. *Materials* 2022, 15, p.1946.
- [6] Song, Y.L., Pan, C.Z., Zhang, J., Zhu, B. TiB<sub>2</sub>-TiC-SiC composites prepared through high-gravity field activated SHS. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, 382, 022048.
- [7] Li, W.-J., Tu, R., Goto, T. Preparation of TiC-TiB<sub>2</sub>-SiC Ternary Eutectic Composites by Arc-Melting and Their Characterizations. *Mater. Trans.* 2006, 47, pp. 1193–1197.
- [8] Mestral, F., Thevenot, F. Ceramic composites: TiB<sub>2</sub>-TiC-SiC. Part I Properties and microstructures in the ternary system. *J. Mater. Sci.*, 1991, 26, pp. 5547–5560.
- [9] Somiya, S. *Handbook of Advanced Ceramics. Materials, Applications, Processing, and Properties*, 2nd ed.; Somiya, S., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2013.
- [10] Grigoriev, S., Vereschaka, A., Milovich, F., Tabakov, V., Sitnikov, N., Andreev, N., Sviridova, T., Bublikov, J. Investigation of multicomponent nanolayer coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb, and Al. *Surf. Coat. Technol.*, 2020, 401, 126258.
- [11] Vereschaka, A.S., Grigoriev, S.N., Sotova, E.S., Vereschaka, A.A. Improving the efficiency of the cutting tools made of mixed ceramics by applying modifying nano-scale multilayered coatings. *Adv. Mat. Res.*, 2013, 712-715, pp. 391-394.
- [12] Akhtar, S.S. A critical review on self-lubricating ceramic-composite cutting tools. *Ceram. Int.*, 2021, 47, pp. 20745–20767.
- [13] Wäsche, R., Klaffke, D. In situ formation of tribologically effective oxide interfaces in SiC-based ceramics during dry oscillating sliding. *Tribol. Lett.*, 1998, 5, pp. 173–190.
- [14] Wäsche, R., Yarim, R., Klaffke, D., Hartelt, M. Oscillating sliding wear behaviour of SiC, TiC, TiB<sub>2</sub>, 59SiC-41TiB<sub>2</sub> and 52SiC-24TiC-24TiB<sub>2</sub> materials up to 750 °C in air. *Tribotest*, 2006, 12, pp. 99–111.
- [15] Fattahi, M., Pazhouhanfar, Y., Delbari, S.A., Shaddel, S., Sabahi Namini, A., Shahedi Asl, M. Influence of TiB<sub>2</sub> content on the properties of TiC-SiCw composites. *Ceram. Int.*, 2019, 46, pp. 7403–7412.
- [16] Shahedi Asl, M., Delbari, S. A., Shayesteh, F., Ahmadi, Z., Motallebzadeh, A. Reactive Spark plasma sintering of TiB<sub>2</sub>-SiC-TiN novel composite. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 81, pp. 119–126.

- [17] Gutiérrez-González, C.F., Pozhidaev, S., Rivera, S., Peretyagin, P., Solís, W., Díaz, L.A., Fernández, A., Torrecillas, R. Longer-lasting Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiCw-TiC cutting tools obtained by Spark plasma sintering. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2017, 14, pp. 367–373.
- [18] Pristiniski, Y., Pinargote, N.W.S., Smirnov, A. The effect of MgO addition on the microstructure and mechanical properties of alumina ceramic obtained by Spark plasma sintering. *Mater. Today Proc.*, 2019, 19, pp. 1990–1993.
- [19] Pristiniski, Y., Pinargote, N.W.S., Smirnov, A. Spark plasma and conventional sintering of ZrO<sub>2</sub>-TiN composites: A comparative study on the microstructure and mechanical properties. *MATEC Web Conf.*, 2018, 224, 01055.
- [20] Sharma, A., Babbar, A., Tian, Y. et al. Machining of ceramic materials: a state-of-the-art review. *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, 2022.
- [21] Schüller M., Herrig T., Bergs T. A study on abrasive waterjet multi-stage machining of ceramics. *Procedia CIRP*, 2022, 108, pp. 770-775.
- [22] Ma, Z., Wang, Q., Liang, Y., Cui, Z., Meng, F., Chen, L., Wang, Z., Yu, T., Liu, C. The mechanism and machinability of laser-assisted machining zirconia ceramics. *Cer. Int.*, 2023, 49 (11-A), pp. 16971-16984.
- [23] Grigoriev, S.N., Nadykto, A.B., Volosova, M.A., Zelensky, A.A., Pivkin, P.M. WEDM as a Replacement for Grinding in Machining Ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC Cutting Inserts. *Metals.*, 2021, 11, p. 882.
- [24] Grigoriev, S.N., Hamdy, K., Volosova, M.A., Okunkova, A.A., Fedorov, S.V. Electrical discharge machining of oxide and nitride ceramics: A review. *Mater. Des.* 2021, 209, p. 109965.
- [25] Bains, P.S., Sidhu, S.S., Payal, H.S., Kaur, S. Magnetic Field Influence on Surface Modifications in Powder Mixed EDM. *Silicon*, 2019, 11, pp. 415–423.
- [26] Bisaria, H., Shandilya, P. The machining characteristics and surface integrity of Ni-rich NiTi shape memory alloy using wire electric discharge machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* 2019, 233(3), pp. 1068-1078.
- [27] Singh, S., Yeh, M.F. Optimization of Abrasive Powder Mixed EDM of Aluminum Matrix Composites with Multiple Responses Using Gray Relational Analysis. *J. Mater. Eng. Perform.* 2012, 21, pp. 481–491.
- [28] Kuo, Y., Yang, T., & Huang, G.-W. The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 55(1), pp. 80–93.
- [29] Girish, B. M., Siddesh, H. S., & Satish, B. M. Taguchi grey relational analysis for parametric optimization of severe plastic deformation process. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(8).



- [30] Deng, J., Yan, Q., Lu, J., Xiong, Q., Pan, J. Optimisation of Lapping Process Parameters for Single-Crystal 4H-SiC Using Orthogonal Experiments and Grey Relational Analysis. *Micromachines* 2021, 12, p.910.
- [31] Suresh Kumar, S., Uthayakumar, M., Thirumalai Kumaran, S., Parameswaran, P., Mohandas, E., Kempulraj, G., Ramesh Babu, B.S., Natarajan, S. A. Parametric optimization of wire electrical discharge machining on aluminium based composites through grey relational analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 20, pp. 33–39.
- [32] Huang, J. T., Liao, Y. S. Optimization of machining parameters of Wire-EDM based on Grey relational and statistical analyses. *International Journal of Production Research*, 2003, 41(8), pp. 1707–1720.
- [33] Sylajakumari, P.A., Ramakrishnasamy, R., Palaniappan, G. Taguchi grey relational analysis for multi-response optimization of wear in co-continuous composite. *Materials* 2018, 11, p. 1743.
- [34] Bisaria, H., Shandilya, P. The machining characteristics and surface integrity of Ni-rich NiTi shape memory alloy using wire electric discharge machining. *Proc IMechE Part C: J. Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(3) pp. 1068–1078.