

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 4 (178). С. 29-40.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 4 (178). P. 29-40.

Научная статья  
УДК 621.9.048.4  
doi: 10.30987/2223-4608-2026-4-29-40

## Влияние межэлектродной среды и энергетических параметров на формируемое покрытие при механизированной электроискровой обработке

Андрей Аркадьевич Жулдыбин<sup>1</sup>, аспирант  
Александр Андреевич Владимиров<sup>2</sup>, к.т.н.  
Антон Иванович Шаповалов<sup>3</sup>, к.т.н.

<sup>1, 2, 3</sup> Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Старый Оскол, Россия

<sup>1</sup> arkad1998@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>2</sup> vladimirov.al.an@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7992-1694>

<sup>3</sup> shapowalow130477@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Представлены перспективы применения электроискрового легирования и сдерживающие факторы его широкого применения в промышленности. Представлены изображения и описание условий работы деталей тележки тепловоза, где перспективно применение технологии упрочнения электроискровым легированием. Представлено описание оборудования, инструментов, материалов и методов исследования механизированной электроискровой обработки в межэлектродных средах. Сформирован план эксперимента по механизированной электроискровой обработке деталей типа тел вращения с различными значениями суммарной энергии за одну минуту обработки в пределах частотно-энергетического режима работы установки электроискрового легирования. Механизированная электроискровая обработка производилась в трех различных межэлектродных средах, сформированных потоками аргона, углекислого газа и воздуха. На экспериментальных образцах измерена шероховатость поверхности электроискрового покрытия. Измерены значения микротвердости и толщины сформированных покрытий. Представлено описание зависимости шероховатости поверхности, микротвердости и толщины покрытия от суммарной энергии за одну минуту обработки для каждой межэлектродной среды. По экспериментальным значениям построены графики зависимостей микротвердости и толщины покрытий. Проведен анализ экспериментальных данных, определены доминирующие факторы и функции отклика. Из результатов анализа зависимостей выбраны межэлектродные среды, для которых характерны значительные изменения процесса электроискрового легирования, оказывающие влияние на микротвердость и толщину покрытия. По графикам полученных зависимостей подобраны уравнения регрессии, позволяющие максимально приближенно описывать зависимости микротвердости и толщины покрытия от суммарной энергии за одну минуту обработки, в диапазоне частотно-энергетических параметров работы установки электроискрового легирования, для каждой межэлектродной среды. На основании проведенных экспериментов и разработанных математических зависимостей, в виде уравнений регрессии, сформулированы промежуточные выводы и направления дальнейших исследований механизированной электроискровой обработки в различных межэлектродных средах.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, межэлектродная среда, шероховатость, сплошность, толщина покрытия, микротвердость, суммарная энергия

**Для цитирования:** Жулдыбин А.А., Владимиров А.А., Шаповалов А.И. Влияние межэлектродной среды и энергетических параметров на формируемое покрытие при механизированной электроискровой обработке // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 4 (178). С. 29–40. doi: 10.30987/2223-4608-2026-4-29-40

## Influence of the interelectrode medium and energy parameters on coating under formation during mechanized electric disintegration

Andrey A. Zhuldybin<sup>1</sup>, PhD student

Alexander A. Vladimirov<sup>2</sup>, PhD. Eng.

Anton I. Shapovalov<sup>3</sup>, PhD. Eng.

<sup>1, 2, 3</sup> Starooskolsky Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) National Research Technological University «MISIS», Stary Oskol, Russia

<sup>1</sup> arkad1998@mail.ru

<sup>2</sup> vladimirov.al.an@yandex.ru

<sup>3</sup> shapowalow130477@yandex.ru

**Abstract.** The article presents the prospects for the application of electrospark alloying and the factors limiting its widespread use in industry. Images and a description of the operating conditions of diesel locomotive bogie components are presented, where the application of electrospark alloying hardening technology is promising. A description of the equipment, tools, materials, and methods for studying mechanized electrospark machining in interelectrode environments is presented. An experiment plan has been developed for mechanized electrospark machining of parts such as bodies of revolution with different values of the total energy per minute of machining within the frequency-energy operating mode of the electrospark alloying unit. Mechanized electrospark machining was performed in three different interelectrode environments formed by flows of argon, carbon dioxide, and air. The surface roughness of the electrospark coating was measured on experimental samples. The microhardness and thickness of the formed coatings were measured. A description of the dependence of the surface roughness, microhardness, and coating thickness on the total energy per minute of machining for each interelectrode environment is presented. Based on experimental data, graphs of microhardness and coating thickness were constructed. The experimental data were analyzed, and dominant factors and response functions were identified. Based on the results of the analysis, interelectrode environments were selected that exhibit significant changes during the electrospark alloying process, affecting microhardness and coating thickness. Regression equations were selected based on the graphs of the obtained dependencies. These equations allow for the most approximate description of the dependences of microhardness and coating thickness on the total energy per minute of machining, within the range of frequency and energy parameters of the electrospark alloying unit, for each interelectrode environment. Based on the experiments and the mathematical dependencies developed, intermediate conclusions and directions for further research on mechanized electrospark machining in various interelectrode environments were formulated in the form of regression equations.

**Keywords:** electrical discharge alloying, interelectrode medium, roughness, continuity, coating thickness, microhardness, total energy

**For citation:** Zhuldybin A.A., Vladimirov A.A., Shapovalov A.I. Influence of the interelectrode medium and energy parameters on coating under formation during mechanized electric disintegration / Science intensive technology in mechanical engineering. 2026. № 4 (178). P. 29–40. doi: 10.30987/2223-4608-2026-4-29-40

### Введение

Известно, что электроискровое легирование позволяет формировать на поверхности детали упрочненный слой, обладающий повышенными физико-механическими характеристиками. Сдерживающими факторами, ограничивающими широкое применение данного процесса, являются: низкая производительность самого электроискрового легирования и перегрев электрода при высокой интенсивности формирования электроискрового покрытия.

Для увеличения производительности электроискрового легирования целесообразно:

– осуществлять механизацию, что позволит повысить сплошность покрытия и поддерживать стабильную скорость его формирования;

– варьировать вид межэлектродной среды с целью интенсификации процесса формирования и корректировки физико-механических свойств покрытия.

Объектом исследования данной работы являются детали тележек тепловозов, такие как палец и валик, представленные на рис. 1.

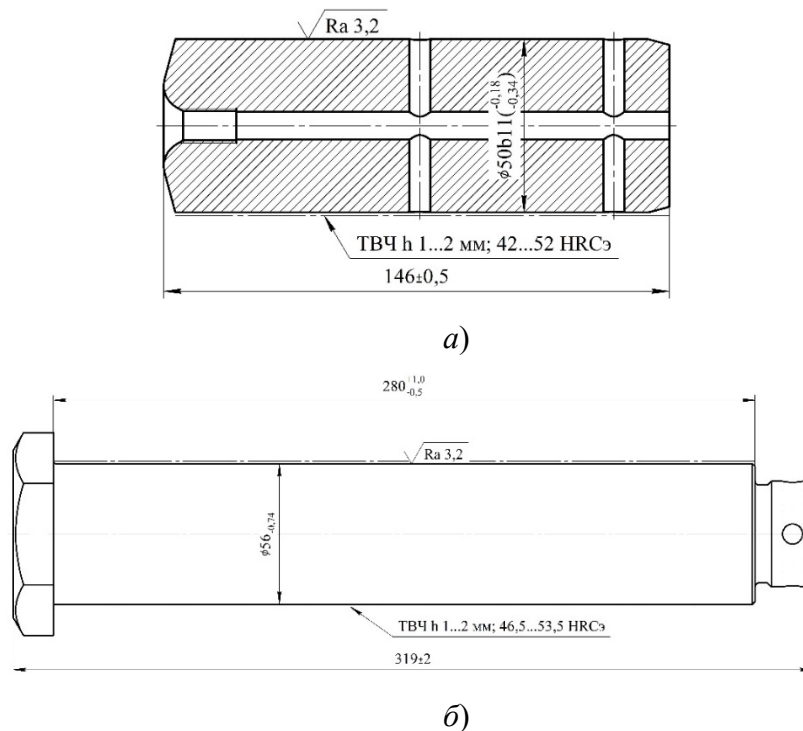


Рис. 1. Детали тележки тепловоза:

*a* – палец; *б* – валик

Fig. 1. Details of the locomotive bogie:

*a* – axial pin; *b* – pivot pin

Данные детали установлены в узле ресорного подвешивания тележки тепловоза модели ТГМ4Б. Обобщая условия работы данных деталей, можно сказать, что основные дефекты, связанные с выходом деталей из строя, напрямую связаны с износостойкостью контактных поверхностей трения скольжения. Таким образом, для увеличения эксплуатационного ресурса деталей палец и валик целесообразно применение электроискрового легирования для упрочнения поверхности и придания ей повышенных физико-механических характеристик.

### Материалы и методы

Для определения рациональных параметров механизированного электроискрового легирования в среде защитных газов необходимо проведение серии экспериментов по формированию покрытий и последующему их изучению.

Механизированное формирование электроискровых покрытий производили на токарно-винторезном станке. Кинематические

параметры механизированного электроискрового легирования были следующими: подача – 0,063 мм/об; частота вращения заготовки – 36 об/мин; число проходов электрода по поверхности – 4 шт. (выполнение такого количества проходов гарантирует формирование максимальной сплошности покрытия); направление подачи по проходам – 2 слева направо, 2 справа налево.

Для формирования покрытия применяли установку для электроискрового легирования марки «Alier-Metal G53» с модернизированным электрододержателем, обеспечивающим создание определенной межэлектродной среды в процессе легирования.

В качестве электрода был принят прямоугольный стержень из твердого сплава марки Т15К6 поперечным сечением 5×6 мм. В качестве заготовки применяли круглый прокат из стали 45 по ГОСТ 1050-2013 в состоянии поставки, после предварительной механической обработки до диаметра 60 мм и разделения обрабатываемой поверхности на участки длиной 30 мм.

В качестве межэлектродной среды были приняты следующие газы: аргон (инертный газ); углекислый газ (активный газ). Для оценки влияния межэлектродной среды была проведена дополнительная серия экспериментов с формированием межэлектродной среды потоком воздуха от компрессора.

Шероховатость сформированных покрытий определяли измерителем шероховатости TR200. Базовая длина для оценки шероховатости составляла 2,5 мм (фактическая длина измерения шероховатости составила  $5l_6 = 12,5$  мм).

Исследование микротвердости сформированных покрытий проводилось на твердомере МЕТОЛАБ 502 по шкале Виккерса в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1. Испытательная нагрузка составляла 0,9807 Н. Исследование толщины покрытия производилось на металлографическом микроскопе 4ХС при увеличении 400×.

Соответствие наименования экспериментальных образцов значению суммарной энергии за одну минуту обработки и межэлектродной среде приведены в табл. 1.

## 1. Условия формирования покрытий

### 1. Conditions of coating formation

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Суммарная энергия за 1 мин обработки $\Sigma E$ , кДж·мин	1,92	5,76	9,6	1,92	5,76	9,6	1,92	5,76	9,6
Межэлектродная среда	Аргон			Углекислый газ			Поток воздуха		

### Результаты и обсуждение

В результате формирования электроискровых покрытий механизированным

способом в различных межэлектродных средах были получены следующие значения шероховатости, представленные в табл. 2.

## 2. Шероховатость электроискровых покрытий

### 2. The roughness of electrospark coatings

№ образца	Значение шероховатости $Ra$ , мкм			
	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Среднее значение
1	5,539	5,513	5,519	5,524
2	7,233	6,720	7,304	7,086
3	6,517	7,583	6,085	6,728
4	6,766	6,537	7,268	6,857
5	6,861	7,054	6,394	6,770
6	7,003	5,764	6,808	6,525
7	6,248	6,479	6,349	6,359
8	6,441	7,268	6,667	6,792
9	7,821	6,707	8,182	7,570

График зависимости шероховатости от суммарной энергии за одну минуту обработки представлен на рис. 2.

Из графика, представленного на рис. 2, очевидно, что шероховатость сформированных

покрытий, при увеличении суммарной энергии за одну минуту обработки изменяется незначительно, а в некоторых случаях значение шероховатости при большем значении суммарной энергии меньше. Что касается межэлектродной

среды, можно отметить, что она также не оказывает значительного влияния

на процесс формирования шероховатости покрытия.

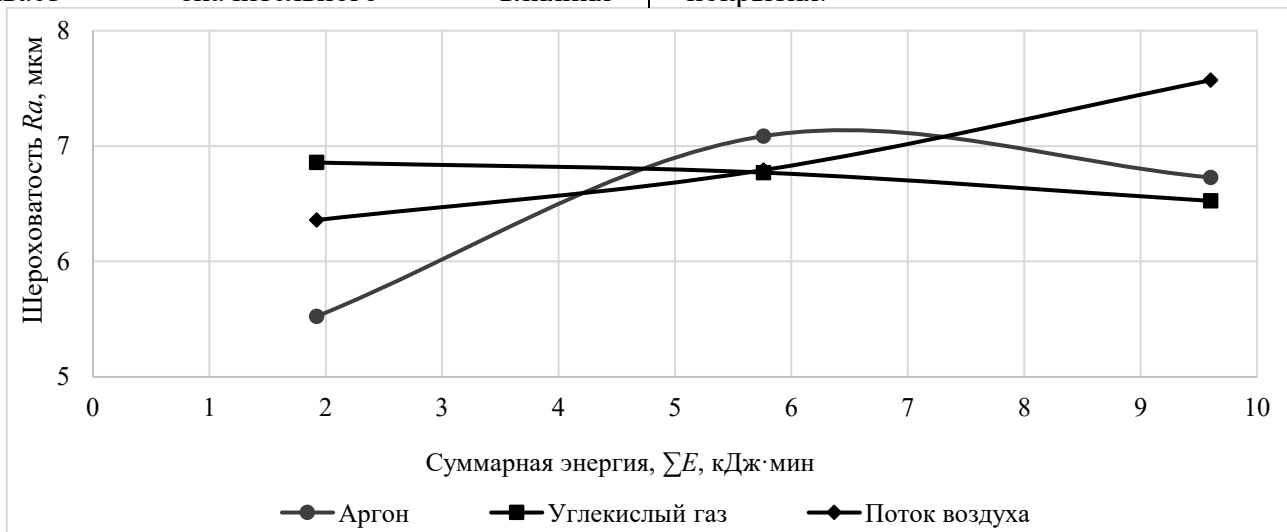


Рис. 2. Зависимость шероховатости от суммарной энергии

Fig. 2. Dependence of roughness on total energy

Исходя из требований к деталям, представленных на рис. 1, сформированная в рамках экспериментов шероховатость требует доработки. Например, поверхностное пластическое деформирование или абразивная обработка.

Таким образом, принимать шероховатость за функцию отклика нецелесообразно. Как для готового изделия, так и для

технологического процесса доработки, значимыми параметрами детали являются твердость и толщина покрытия.

Следующим этапом изучения сформированных покрытий было исследование твердости и толщины покрытий. Полученные в результате измерений микротвердости значения представлены в табл. 3.

### 3. Микротвердость электроискровых покрытий

#### 3. Microhardness of electrospark coatings

№ образца	Значение микротвердости 0,1 HV, кг/мм <sup>2</sup>			
	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Среднее значение
1	321,8	755,8	651,9	576,5
2	453,7	514,1	458,9	475,57
3	764	567,6	537,2	622,93
4	575,9	570	740,5	628,80
5	810,3	753,6	756,5	773,47
6	493,6	512,8	816	607,47
7	869	659,1	379,7	635,93
8	979,6	1092	1020	1030,53
9	676,3	836,3	1518,9	1010,5

График зависимости микротвердости покрытия от суммарной энергии за одну минуту обработки представлен на рис. 3.

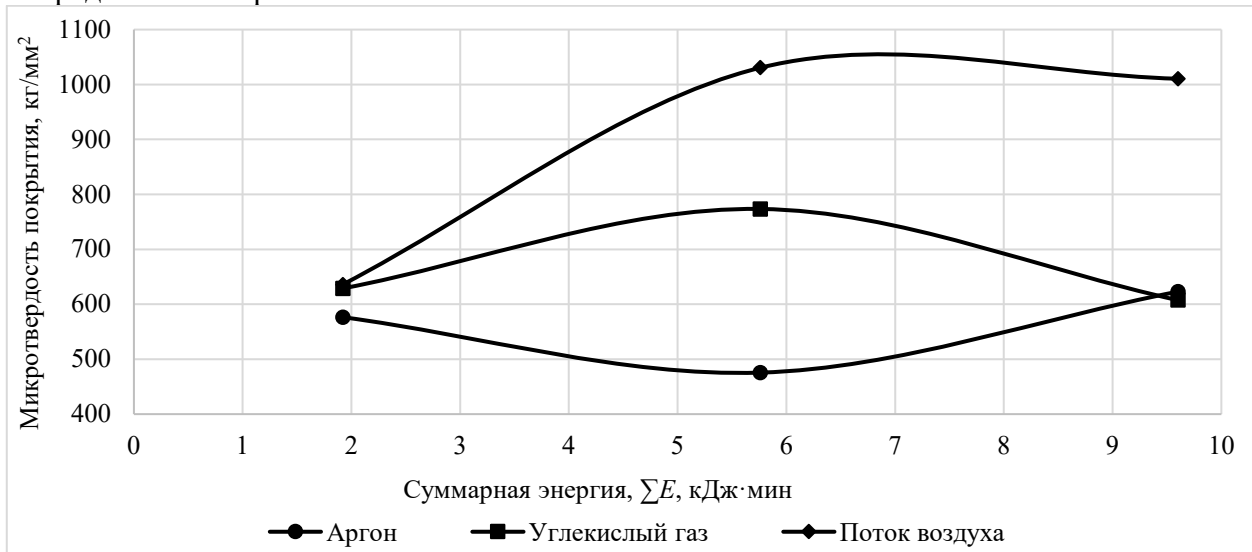


Рис. 3. Зависимость микротвердости покрытия от суммарной энергии

Fig. 3. Dependence of the microhardness of the coating on the total energy

Из анализа кривых, представленных на рис. 3, очевидно, что микротвердость покрытия от суммарной энергии растет только в межэлектродной среде, сформированной потоком воздуха. Для аргоновой межэлектродной среды при увеличении суммарной энергии со значения 1,92 до 9,6 кДж·мин микротвердость незначительно выросла, несмотря на то, что при значении энергии 5,76 кДж·мин было отмечено падение микротвердости до значения

475,57 кг/мм<sup>2</sup>. Напротив, микротвердость покрытия в углекислотной межэлектродной среде незначительно снизилась при тех же значениях суммарной энергии, за исключением микротвердости 773,47 кг/мм<sup>2</sup>, полученной при энергии 5,76 кДж·мин.

Другой характер зависимости от суммарной энергии имеет толщина покрытия. Результаты измерений толщины покрытий представлены в табл. 4.

#### 4. Толщина электроискровых покрытий

##### 4. Thickness of electrospark coatings

№ образца	Толщина покрытия, мкм			
	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Среднее значение
1	30	30	30	30
2	40	20	30	30
3	40	30	40	37
4	30	30	30	30
5	30	30	30	30
6	20	20	20	20
7	30	30	30	30
8	30	40	40	37
9	30	30	30	30

График зависимости толщины покрытия от суммарной энергии за одну минуту обработки представлен на рис. 4.

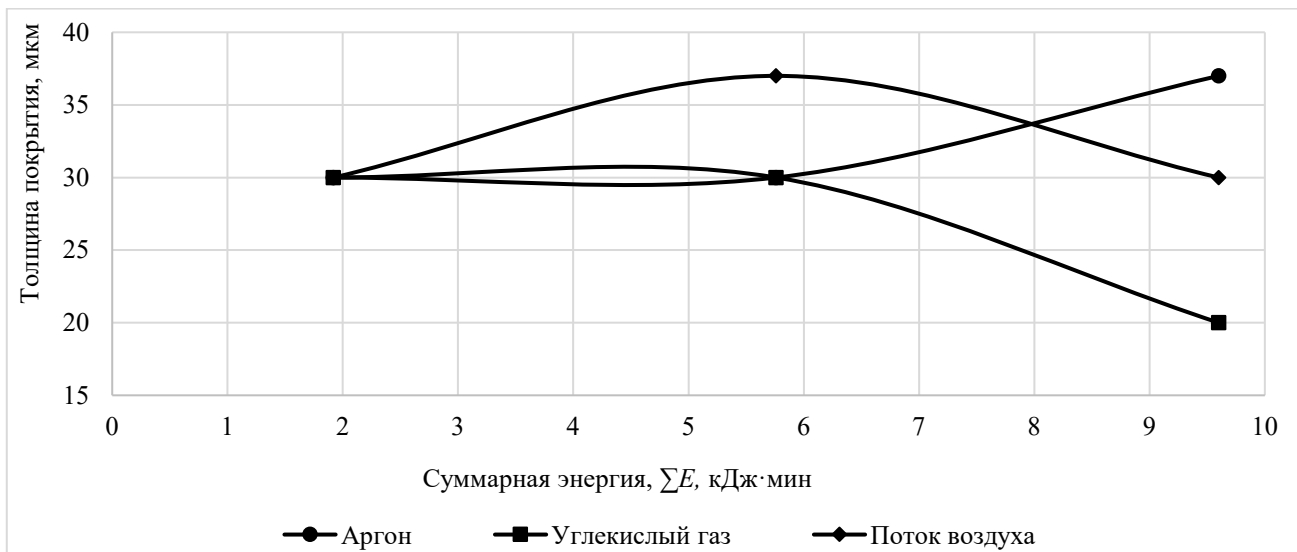


Рис. 4. Зависимость толщины покрытия от суммарной энергии

Fig. 4. Dependence of coating thickness on total energy

Анализ кривых, представленных на рис. 4 показал, что толщина покрытия от суммарной энергии в различных межэлектродных средах изменялась значительно. Например, для аргоновой межэлектродной среды характерно увеличение толщины покрытия с 30 до 37 мкм. Для межэлектродной среды из углекислого газа характерно уменьшение толщины покрытия с 30 до 20 мкм при увеличении суммарной энергии со значения 1,92 до 9,6 кДж·мин. В межэлектродной среде из потока воздуха толщина покрытия при увеличении суммарной энергии со значения 1,92 до 9,6 кДж·мин осталась на одном и том же уровне, за исключением значения толщины покрытия 37 мкм при суммарной энергии 5,76 кДж·мин.

Обобщая полученные зависимости, можно сформулировать промежуточные выводы:

- шероховатость покрытия от межэлектродной среды и значения суммарной энергии в исследуемом диапазоне не изменяется;

- микротвердость покрытия имеет зависимость как от межэлектродной среды, так и от суммарной энергии;

- толщина покрытия имеет некоторую зависимость как от межэлектродной среды, так и от суммарной энергии, но разность значений толщин может отличаться в пределах погрешности, что в свою очередь требует дополнительных исследований с другими значениями суммарной энергии;

- из полученных экспериментальных данных, в качестве межэлектродной среды целесообразно будет оставить аргон и поток воздуха, т.к. для этих сред характерны значительные изменения процесса легирования;

- для определения зависимостей свойств покрытия от межэлектродных сред и суммарной энергии целесообразно проведение дополнительных серий экспериментов.

Таким образом, были проведены дополнительные серии экспериментов в двух межэлектродных средах и с большими значениями суммарной энергии. Скорректированные и дополненные данные по соответствию наименования экспериментальных образцов значению суммарной энергии за одну минуту обработки и межэлектродной среде приведены в табл. 5.

## 5. Скорректированные условия формирования покрытий

### 5. Adjusted coating formation conditions

№ образца	Суммарная энергия за 1 мин обработки $\sum E$ , кДж·мин	Межэлектродная среда
1	1,92	Аргон
2	5,76	Аргон
3	9,6	Аргон
10	12,29	Аргон
11	15,36	Аргон
7	1,92	Поток воздуха
8	5,76	Поток воздуха
9	9,6	Поток воздуха
12	12,29	Поток воздуха
13	15,36	Поток воздуха

Значения микротвердости сформированных покрытий с дополнительными экспериментами представлены в табл. 6.

## 6. Микротвердость электродисковых покрытий с дополнительными экспериментами

### 6. Microhardness of electrospark coatings with additional experiments

№ образца	Значение микротвердости HV 0,1, кг/мм <sup>2</sup>			
	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Среднее значение
1	321,8	755,8	651,9	576,5
2	453,7	514,1	458,9	475,57
3	764,0	567,6	537,2	622,93
10	1608,9	747,7	999,6	1118,73
11	726,4	998,4	833,7	852,83
7	869	659,1	379,7	635,93
8	979,6	1092	1020	1030,53
9	676,3	836,3	1518,9	1010,5
12	791,7	884,7	683,8	786,73
13	730,6	790,2	1132,9	884,57

Графики зависимости микротвердости покрытия от суммарной энергии за одну минуту обработки с дополнительными экспериментами в различных межэлектродных средах

и предполагаемые уравнения математической зависимости представлены на рис. 5 и 6.

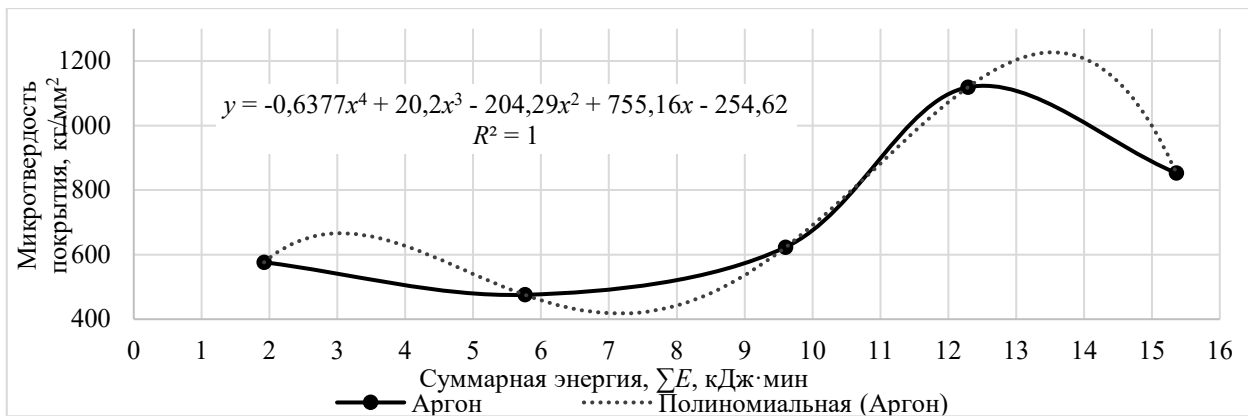


Рис. 5. Зависимость микротвердости покрытия от суммарной энергии в аргоновой межэлектродной среде

Fig. 5. Dependence of the coating microhardness on the total energy in the argon interelectrode environment

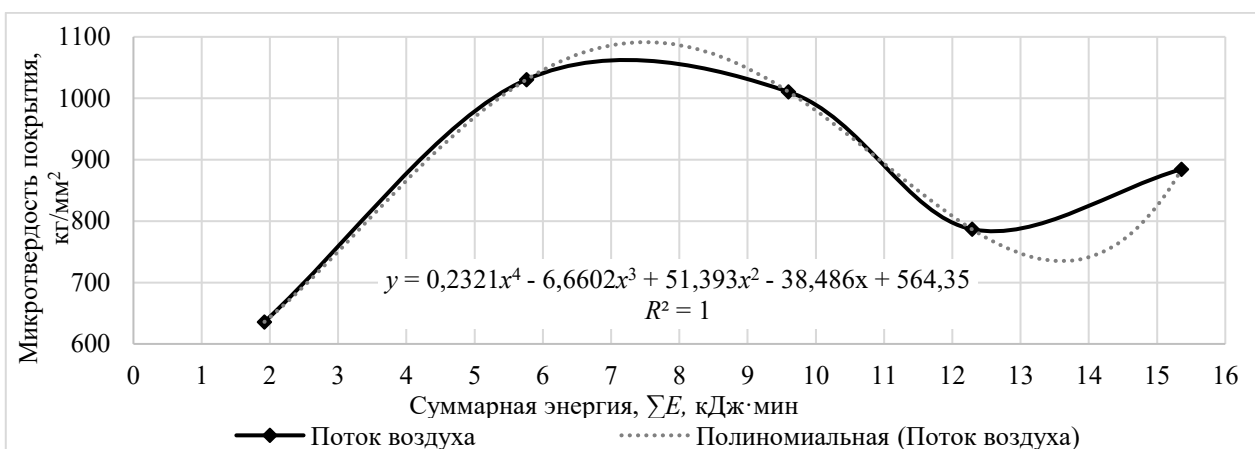


Рис. 6. Зависимость микротвердости покрытия от суммарной энергии в потоке воздуха

Fig. 6. Dependence of the coating microhardness on the total energy in the air flow

Из анализа зависимостей микротвердости при увеличении суммарной энергии до значения 15,36 кДж·мин стоит отметить следующие особенности:

- микротвердость покрытия в аргоновой межэлектродной среде при суммарной энергии 12,29 кДж·мин возрастает до максимального, в рамках данного эксперимента, значения 1118,73 кг/мм<sup>2</sup>, дальнейшее увеличение суммарной энергии приводит к снижению микротвердости до 852,83 кг/мм<sup>2</sup>;

- микротвердость в межэлектродной среде, сформированной из потока воздуха, наоборот, при увеличении суммарной энергии до значения 12,29 кДж·мин, снижается, при дальнейшем увеличении суммарной энергии до значения 15,36 кДж·мин снова возрастает, но само значение микротвердости ниже, чем при энергии 5,76 и 9,6 кДж·мин.

Возможно, такой характер формирования твердости покрытия связан с параметрами режимов работы установки электроискрового легирования, которые включают в себя силу тока, мощность импульсного разряда, длительность импульса и частоту следования импульсов.

Что касается математического описания зависимости микротвердости от суммарной энергии, как очевидно из графика, то в обоих случаях это уравнение четвертой степени. При этом стоит отметить, что значение коэффициента достоверности аппроксимации уравнений регрессии равно единице, что свидетельствует о высоком уровне соответствия действительному процессу.

Величины толщин покрытий с дополнительными экспериментами представлены в табл. 7.

7. Толщина электродисковых покрытий с дополнительными экспериментами

7. Thickness of electric spark coatings with additional experiments

№ образца	Толщина покрытия, мкм			
	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Среднее значение
1	30	30	30	30
2	40	20	30	30
3	40	30	40	37
10	50	40	60	50
11	30	30	30	30
7	30	30	30	30
8	30	40	40	37
9	30	30	30	30
12	50	60	60	56,7
13	60	60	60	60

Графики зависимости толщины покрытия от суммарной энергии за одну минуту обработки с дополнительными экспериментами в различных межэлектродных средах и предполагаемые уравнения математической зависимости представлены на рис. 7 и 8.

Из анализа зависимостей толщины покрытия при увеличении суммарной энергии до значения 15,36 кДж·мин также стоит отметить некоторые особенности:

– толщина покрытия в аргоновой межэлектродной среде при суммарной энергии 12,29 кДж·мин возрастает до максимального, в

рамках данного эксперимента, значения 50 мкм, дальнейшее увеличение суммарной энергии приводит к снижению толщины покрытия до 30 мкм, что соответствует меньшим значениям суммарной энергии;

– толщина покрытия в межэлектродной среде, сформированной из потока воздуха, при увеличении суммарной энергии до значения 12,29 кДж·мин, увеличивается до значения 56,7 мкм, при дальнейшем увеличении суммарной энергии до значения 15,36 кДж·мин толщина покрытия доходит до 60 мкм.

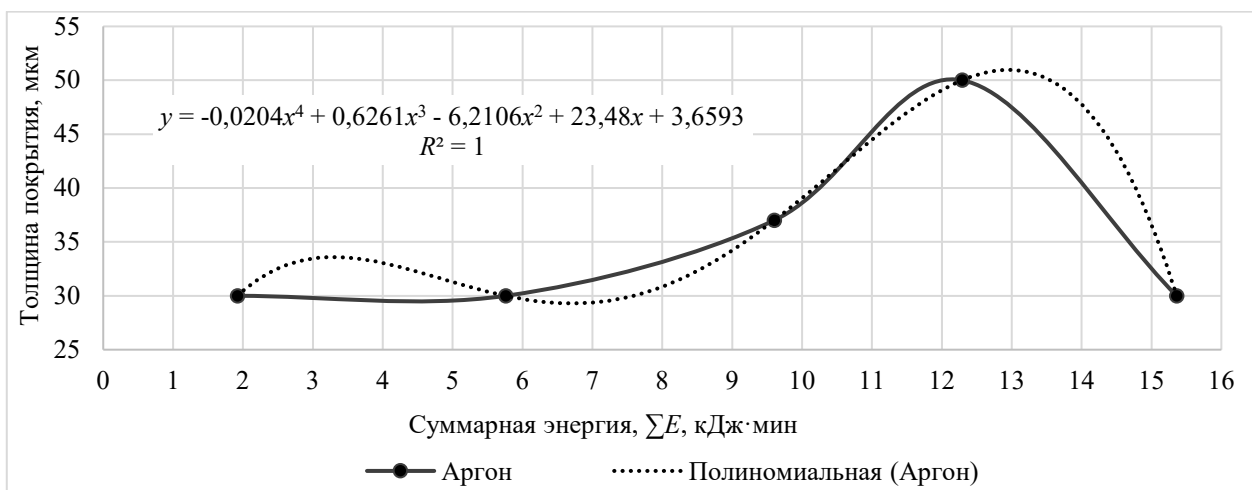


Рис. 7. Зависимость толщины покрытия от суммарной энергии в аргоновой межэлектродной среде

Fig. 7. Dependence of the coating thickness on the total energy in an argon interelectrode medium

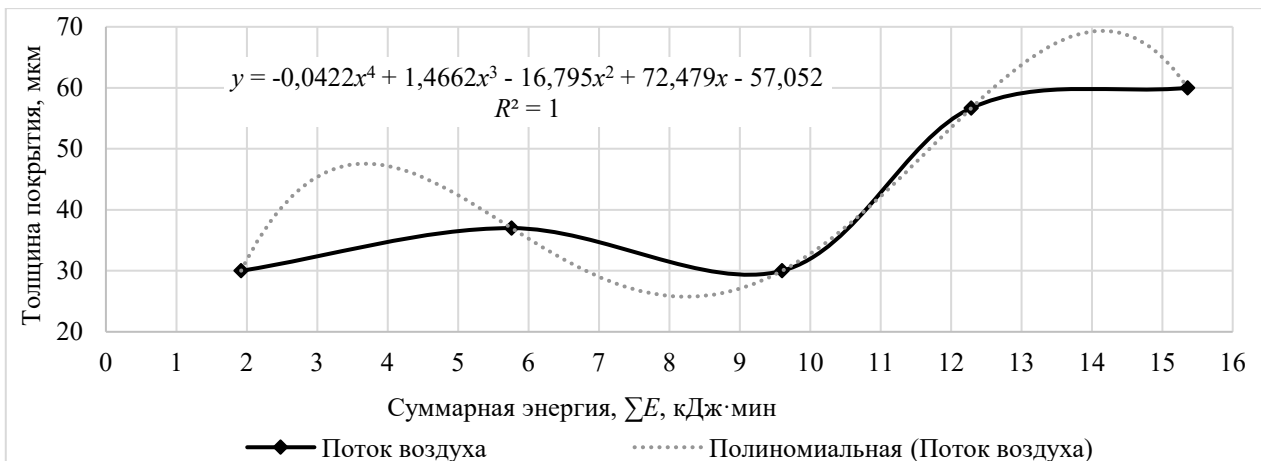


Рис. 8. Зависимость толщины покрытия от суммарной энергии в потоке воздуха

Fig. 8. Dependence of the coating thickness on the total energy in the air flow

Также, как и в случае зависимости микротвердости от суммарной энергии, прослеживается аналогичный характер формирования толщины покрытия, который также может быть связан с параметрами режимов работы установки электроискрового легирования.

Математическое описание зависимости толщины покрытия от суммарной энергии, как очевидно из графика, для двух межэлектродных сред является уравнением четвертой степени. Коэффициент достоверности аппроксимации уравнений регрессии также равен единице, что также свидетельствует о высоком уровне соответствия действительному процессу.

### Выводы

Таким образом, обобщая полученные результаты, целесообразно сформулировать дальнейшие направления исследований:

- исследовать зависимость микротвердости и толщины от суммарной энергии в широком диапазоне доступных частотно-энергетических режимов работы установки электроискрового легирования;
- исследовать влияние энергии единичного импульсного разряда при одинаковом значении суммарной энергии за одну минуту обработки, но при разной длительности импульсного разряда;
- провести теоретические исследования выявленных зависимостей микротвердости и

толщины покрытия от суммарной энергии методом крутого восхождения по градиенту;

- произвести оценку сплошности формируемого электроискрового покрытия от количества проходов в разных межэлектродных средах.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий, В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
2. Верхогуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток: Дальнаука, 1995. 323 с.
3. Пойда А.А. Тепловозы: Механическое оборудование: Устройство и ремонт: Учебник для техн. школ. М.: Транспорт, 1988. 320 с.
4. Ким В.А., Коротаев Д.Н. Газовая среда – фактор упрочнения при электроискровом легировании // Электронная обработка материалов. Кишинев: 1998. С. 37–43.
5. Коротаев Д.Н., Машков Ю.К. Технологические возможности управления износостойкостью поверхностей трения при электроискровом легировании // ОНВ. 2006. № 10 (48).
6. Коротаев Д.Н. Управление качеством формирования износостойких поверхностных слоев методом электроискрового легирования // Справочник. Инженерный журнал. 2015. № 5. С. 34–37.
7. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей. М.: Машиностроение. 2008. 320 с.
8. Жулдыбин А.А. Перспективы применения электроискрового легирования для повышения ресурса деталей тележек тепловозов // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы двадцать первой Всероссийской научно-практической конференции, Старый Оскол, 29

ноября 2024 года. Старый Оскол: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». 2024. С. 416–419. EDN LVFCNP.

9. **Жулдыбин А.А.** Определение направлений исследования электроискрового легирования в защитных средах // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы двадцать первой Всероссийской научно-практической конференции, 29 ноября 2024 года. Старый Оскол: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». 2024. С. 420–424. EDN FFSTHW.

10. **Жулдыбин А.А.** Перспективы применения механизированной электроискровой обработки в защитных средах для деталей судового оборудования // Актуальные проблемы науки и техники. 2025: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 95-летию Донского государственного технического университета, 12–14 марта 2025 года. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2025. С. 804–805. EDN TEBCFY.

11. **Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З.** Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения: Учебное пособие. 5-е изд., стер. / Под ред. Б.П. Демидовича. СПб.: Издательство «Лань», 2021. 400 с.

## REFERENCES

1. Gitlevich A.E. Mikhailov V.V., Parkansky N.Ya., Revutsky, V.M. Electrosark alloying of metal surfaces. Chisinau: Stiinca, 1985. 196 p.

2. Verkhoturov A.D. Formation of surface layer on metals during ESA process. Vladivostok: Dalnauka Publ., 1995. 323 p.

3. Poida A.A. Diesel locomotives: Mechanical equipment: Arrangement and maintenance: Textbook for technical schools. Moscow: Transport, 1988. 320 p.

4. Kim V.A., Korotaev D.N. The gas medium is a hardening factor in electric spark alloying // Electronic processing of materials. Chisinau. 1998. pp. 37–43.

5. Korotaev D.N., Mashkov Yu.K. Technological capabilities of controlling the wear resistance of friction surfaces during ESA // ONV. 2006. No. 10 (48).

6. Korotaev D.N. Quality management of the formation of wearproof blankets by the method of electric spark alloying // Guide. Engineering magazine. 2015. No. 5. pp. 34–37.

7. Suslov A.G. Surface engineering of parts. Moscow: Mashinostroenie. 2008. 320 p.

8. Zhuldybin A.A. Prospects of using electric spark alloying to increase the service life of diesel locomotive body parts // Modern problems of the mining and metallurgical complex. Science and Production: proceedings of the twenty-first All-Russian Scientific and Practical Conference, Stary Oskol, November 29, 2024. Stary Oskol: National Research Technological University «MISIS». 2024. pp. 416–419. EDN LVFCNP.

9. Zhuldybin A.A. Determination of research directions of electrospark alloying in protective environments // Modern problems of the mining and metallurgical complex. Science and Production: proceedings of the twenty-first All-Russian Scientific and Practical Conference, November 29, 2024. Stary Oskol: National Research Technological University «MISIS». 2024. pp. 420–424. EDN FFSTHW.

10. Zhuldybin A.A. Prospects of application of mechanized electric desintegration in protective environments for ship equipment parts // Actual problems of science and technology. 2025: Proceedings of the All-Russian (national) Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of the Don State Technical University, March 12-14, 2025. Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2025. pp. 804–805. EDN TEBCFY.

11. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. Numerical methods of analysis. Approximation of functions, differential and integral equations: A textbook. 5th ed., ster. / Edited by B.P. Demidovich. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2021. 400 p.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.08.2025; одобрена после рецензирования 30.11.2025; принята к публикации 14.12.2025.

The article was submitted 11.08.2025; approved after reviewing 30.11.2025; assepted for publication 14.12.2025.