



**ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ  
ЗАВТРА**



VI Всероссийский сетевой конкурс студенческих проектов с участием студентов с инвалидностью

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»**

**Направление «Профессиональное завтра в науке»**

**Номинация «Научная статья»**

**«Исследования воздействия скорости вращения электрода на толщину и шероховатость электроискровых покрытий при различных режимах работы электроискровой установки»**

**Выполнили:**

Тухватуллин Олег Евгеньевич  
Сайфуллин Ринат Назирович

**Руководитель:**

доктор технических наук,  
профессор кафедры технологии материалов и реновации машин  
Сайфуллин Ринат Назирович

Уфа, 2023 г.

**УДК 621.9.048**

**Аннотация.** В статье рассматривается актуальная проблема получения эффективной толщины повышенной сплошности слоя электроискрового покрытия, приведены исследования толщины электроискровых покрытий, шероховатости покрытий в зависимости от заданных режимов обработки электроискровой установки с изменением частоты вращения электрода. Для повышения толщины и уменьшения шероховатости электроискрового покрытия предлагается оптимизировать значения параметров электроискровой установки модели SZ-8100, таких, как: скважность тока, параметр частоты тока и скоростей вращения электрода на электрододержателе. В результате лабораторных исследований получены следующие результаты: максимальная толщина электроискрового наращивания получена на скважности тока  $t_{имп}=100$  мкс, напряжении  $U=60$  В, при частоте тока  $f=300$  Гц и скорости вращения электрода  $n=260$  мин<sup>-1</sup>, в котором она составляет 1,88 мм (по вершинам шероховатостей). В результате проведенных лабораторных исследований установлено, что параметр частоты тока оказывает наибольшее влияние на температурный режим нагрева анод электрода. С увеличением параметра частоты тока происходит более интенсивное электроэрозионное разрушение частиц электрической искры. Увеличение параметра скважности тока  $t_{имп}$  с 50 мкс до 100 мкс поспособствовало увеличению толщины электроискрового наращивания на 0,84 мм. Экспериментальным путем установлено, что в случае повышения скорости вращения электрода на электрододержателе, вершины вновь образуемых капель электрической искры способствуют ускоренному стачиванию, быстрее охлаждаются и толщины электроискровых покрытий формируются с меньшей производительностью. Наименьшие толщины электроискрового слоя формируются при малых значениях параметра частоты тока при  $f=50$  Гц, на обоих режимах работы скважности тока  $t_{имп}=50$  мкс и  $t_{имп}=100$  мкс, толщины покрытий в заданных интервалах варьируются в

пределах от 0,04 мм до 0,45 мм. Данное проведенное экспериментальное исследование поможет выбрать оптимальные значения параметров электроискровой установки, которая в свою очередь способствует повышению производительности процесса электроискровой наплавки.

**Abstract.** The article presented actual problems studies of the thickness of electro spark coatings depending on the specified processing modes of the electro spark installation with a change in the frequency of rotation of the electrode. To increase the thickness of the electro spark coating, it proposed to optimize the values of the parameters of the electro spark installation model SZ-8100, current frequency, current cycle pulse duration and frequency of rotation of the electrode. As a result of experimental studies, the following results obtained: the most thickness of the electro spark build up obtained at a pulse duration  $t_{imp} = 100$  microseconds, voltage  $U = 60V$ , current frequency  $f = 300$  Hz, at an electrode rotation frequency  $n = 260 \text{ min}^{-1}$  and it is 1.88 mm (along the roughness vertices). In experimental studies, it found that the current frequency parameter has a significant effect on the temperature regime of heating the surfacing electrode. Electro erosive destruction of particles by an electro spark processing, with an increase in the current frequency parameter, occurs. An increase in the pulse duration  $t_{imp}$  from 50 microseconds to 100 microseconds contributed to an increase in the thickness of the electro spark build up by 0.84 mm. It found that in the case of an increase in the rotation frequencies of the electrode on the electrode holder, the tops of the formed electro spark grind polished, cooled faster and the thicknesses of electro spark coatings obtained with lower productivity. The smallest thicknesses of the electro spark build up formed at low values of the current frequency at  $f = 50$  Hz, in both modes of the current duty cycle  $t_{imp} = 50$  microseconds,  $t_{imp} = 100$  microseconds and the formation of the thickness of the electro spark build up in the aisles varies from 0.04 mm to 0.45 mm. This study will help to choose the optimal values of the parameters of the electro spark installation, and increase the productivity of the process obtaining an effective thickness of the electro spark coating.

**Ключевые слова:** *энергия разряда, электроискровое наращивание, поверхность, толщина, обработка поверхности.*

**Key words:** *discharge energy, electro spark buildup, surface, thickness, surface treatment.*

**Введение.** Развитие современного машиностроения не возможно без упрочняющих технологий, а промышленная революция в мире достигается путем внедрения новых прогрессивных технологий и методов обработки металлических поверхностей. К числу таких методов относят и технологию электроискрового воздействия, которую традиционно называют технологией электроискрового наращивания. Данная технология основана на применении электрохимических и электрофизических процессов на локальные участки воздействия обрабатываемой детали. В процессе электроискровой обработки протекают сложные физико-химические процессы, которые в итоге приводят к полярному отложению (переносу) материала анод электрода, на катод электрод (изделие) в сопровождении с изменчивостью баланса тепла, образующегося в результате эрозионного разрушения электрических разрядов [1].

Метод электроискрового наращивания широко применим во многих отраслях производства при упрочнении, восстановлении деталей машин и оборудования мало и средне изношенных поверхностей. Технологией электроискрового наращивания восстанавливают следующие детали: коренные опоры блока цилиндров автомобилей, штоки гидроцилиндров сельскохозяйственной техники, мерные поршни и всасывающие камеры тестоделительных устройств, вилки переключения коробок передач, корпуса различных дифференциалов и другие детали.

Универсальность применения технологии электроискрового наращивания обусловлено возможностью нанесения на обрабатываемую поверхность электродами практически всех токопроводящих материалов, широким варьированием диапазона электрических режимов обработки, а также мобильность применения электроискровых установок с возможностью

обработки поверхностей в труднодоступных местах износа и с незначительным тепловым воздействием на деталь [2].

Толщину, шероховатость поверхностей электроискровых покрытий, принято считать качественными характеристиками при восстановлении и упрочнении деталей подвергшихся незначительному износу. Сдерживающим фактором применения технологии электроискрового наращивания, как отмечают производственники, является наличие барьера по толщине слоя нанесенного покрытия. Создателями метода электроискрового наращивания, супругами Борисом Романовичем и Натальей Иоасовной Лазаренко, отмечалось наличие порога зоны насыщения по толщине электроискровых покрытий, за которым прекращался рост формирования толщины [3].

Тематика исследований изучения электроискрового наращивания и упрочнения деталей методом электроискровой обработки актуальна и в наши дни. Путям совершенствования данной технологии обработки металла посвящены теоретические и экспериментальные исследования многих выдающихся ученых со всего мира.

Выбор электрического диапазона режимов обработки для электроискрового наращивания установкой “БИГ-5” описаны в статье [4]. В данной работе установлен рациональный диапазон удельного времени обработки по упрочнению восстанавливаемой поверхности. В проведенных исследованиях решалась актуально поставленная задача исследователями по определению влияния искрового разряда на катод, в зависимости от исходной шероховатости поверхности. Исследования проводились на образцах катода из стали Ст3, алюминия АД1, сплав титан ВТ6, меди М1, с использованием твердотельных сплавов Т15К6 и ВК8. В качестве наплавляемого электрода авторами экспериментов использовался графитовый электрод МПГ-6. Работа была проведена на двух режимах обработки электроискровой установки “БИГ-5” с энергией импульсов 0,11 и 1,8 Дж и изменением амплитудного тока электроискровой установки с 120 и до 200 Ампер, частоту импульсов при этом не изменяли, она равнялась 160

Гц на обоих заданных режимах обработки поверхностей. В результате проделанных экспериментов было установлено, что наибольшему эрозионному разрушению подвержен алюминий из-за своей низкой температуры плавления, а наиболее эрозионно-устойчивым материалом обозначили титан. Исследователь также установил, что сплав из меди в сравнении со сталью Ст3 более склонен к разрушению с увеличением энергии импульсов. Анализируя полученные данные по вершинам шероховатости покрытий, установили, что при минимальных значениях шероховатости образцов наблюдается максимальное увеличение толщины покрытия электроискрового наращивания.

В исследовательской работе [5] Л.А. Концевой и В.Д. Власенко проделана работа по определению теплового распределения полей температур в поверхностных слоях электроискрового упрочнения с построением её математической модели. В данных экспериментальных исследованиях, нагрев прямоугольной зоны катода тепловым потоком  $q_0$ , на начальном этапе проектирования сложных математических расчетов была построена в декартовой системе координат. Построение математической модели между одной выбрасываемой каплей электрической искры на катод, представляется сложным нелинейным теплообменом, для расчета уравнения которого, авторы используют вторую формулу Грина [6]. Разработанный метод численного расчета позволил упрощенно описать полученный эффект нагрева и остывания капли электрода, при электроискровом воздействии на локальном участке воздействия электроискрового наращивания. Апробированные результаты интегральных отношений в исследованиях описывают процессы теплообмена между катодом и каплями выброшенной электрической искры. Используя полученные данные, выбор материала анода для формирования электроискровых покрытий с присущими ей свойствами во многом упрощается.

Зарубежные исследователи [7] провели сравнительный анализ микро-твердости покрытий с использованием электродов Ti, TiC, W и WC на

чистый железоуглеродистый сплав катод электрода Fe-C. Авторы данной статьи получили результаты снимков фотоэлектронного микроскопа и спектрального изображения полученных образцов покрытий и пришли к выводу, что в процессе электроискровой обработки во время выгорания электродов образуются сложные химические соединения, состоящие из: карбидов, нитридов и оксидов, а качество микротвердости поверхностей покрытий во многом зависит от химического состава электродного материала. Авторы исследований настоятельно рекомендуют для получения высококачественных поверхностей, комбинированные методы электроискровой обработки с лазерной обработкой, с целью получения толстослойных покрытий повышенной сплошности. Однако в приведенной литературе не производились исследования влияния скорости вращения электрода на толщину электроискровых покрытий при различных режимах обработки.

**Цель исследования.** Провести анализ влияния скорости вращения электрода на толщину электроискровых покрытий при различных режимах обработки.

**Методы исследования.** Для электроискрового наращивания использовали микро-сварочную установку модели SZ-8100.



Рисунок 1- Электроискровая установка модели SZ-8100

Для увеличения скорости частоты вращения электрода использовали ручную дрель “ДУ-13/650R” и гравёрную бор машину “Калибр ЭГ – 145”. Ток к электроду подводили при помощи токопроводящих графитовых щеток соединенных с источником напряжения (электроискровая установка SZ-8100).

Скорость вращения электрода на самой электроискровой установке модели SZ-8100 находится в пределах  $n=260\dots910$  оборотов в минуту ( $\text{мин}^{-1}$ ), для ручной дрели ДУ-13/650R использовали скорости вращения  $n=1200\dots2700$   $\text{мин}^{-1}$  и для граверной бор машины, скорости вращения электрода составили  $n=7500\dots32000$   $\text{мин}^{-1}$ . Регулировка скоростей вращений электродов, регулировалась при кнопках изменений количества оборотов на приспособлениях. На рисунке 2, представлены ручные вращатели, с помощью которых изменяли скорости вращения электрода.



а



б



в

Рисунок 2 - Приспособления электрододержателей применимые для изменения частоты вращения электрода

а- вращатель электрода электроискровой установки SZ-8100;

б- дрель ДУ-13/650R; б- гравер Калибр ЭГ – 145

На рисунке 3 представлен часовой тахометр модели ТЧ 10-Р, при помощи которого определяли скорость вращения электрода на электрододержателях.

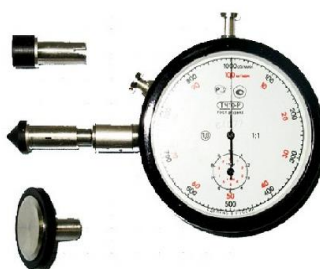


Рисунок 3- Часовой тахометр модели ТЧ 10-Р

Используемые нами режимы скоростей вращения электрода на выбранных приспособлениях в качестве электрододержателя определены в таблице 1.

Таблица 1 - Режимы скорости вращения электрода на электрододержателях.



Используемые вращатели для электрода	Частоты вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>			
	Вращатель электроискровой установки SZ-8100	260	490	910
Дрель ДУ-13/650R	1200	1500	2650	
Гравер «Калибр» ЭГ - 145	7500	10200	13000	32000

Часовой тахометр ТЧ 10-Р рассчитан для измерения частоты вращения до скорости равным 10000 об/мин<sup>-1</sup>, скорости вращения граверной машины значительно выше, чем может определить тахометр ТЧ 10-Р, частоты вращения в данном случае были определены согласно паспортно-технической документации режимов вращения инструмента машинки гравера «Калибр ЭГ – 145».

Для исследования использовали следующие 6 режимов работы электроискрового наращивания, которые обозначены в таблице 2. На каждом заданном режиме электроискровой установки (таблица 2) производили электроискровое наращивание покрытий, на скоростях вращения электрода обозначенных в таблице 1.

Таблица 2- Режимы электроискровой обработки поверхностей

Режимы обработки	$f$ – частота тока, Гц	$t_{имп}$ – скважность тока, мкс	$U$ – напряжение тока, В
1.	50	50	60
2.	50	100	60
3.	300	50	60
4.	300	100	60
5.	500	50	60
6.	500	100	60

Для эксперимента материалом электродаиспользовали, никелевый сплав ERNiCr3. Его химический состав приведен в таблице 3.

Таблица 3- Химический состав использованного электрода.

Название материала.	Химический состав.
ERNiCr3	(Ni) < 67%; (Cr) 18-22%; (Mn) 2,5-3,0%; Железо (Fe) 3,0%; (Mo)

	2,0%; Ниобий + Талий (Nb+Ta) 2,0-3,0 % Остальное примеси.
--	--

Образцами для нанесения электроискрового покрытия служили пластины Ст3 (Сталь 3), вырезанные размерами 40\*100 мм.

Свойства и характеристики материала катода стали марки Ст3 представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Свойства и характеристики материала катода

Параметр и характеристики катода	Величина
Плотность, $\rho_0$	7800 кг/м <sup>3</sup>
Удельное электросопротивление, $\rho$	$17 \cdot 10^{-8}$ Ом·м
Удельная теплоемкость, С	523 Дж/кг/град
Коэффициент теплопроводности, $\lambda$	41,9 Вт/м/град

Электроискровое наращивание производили в четыре слоя площадью 1,5x1,5 см<sup>2</sup>. После нанесения 4 слоев на конкретно заданном режиме работы, проводился замер толщины цифровым микрометром. Достоверность измерений проверяли троекратным замером толщины. Результаты полученных толщин обрабатывались в прикладной программе Microsoft Excel с её графическим отображением полученных результатов.

**Теоретический обзор.** В процессе нанесения электроискровых покрытий принято руководствоваться параметрами как: длительность импульсов электроискровой обработки, выбор оптимальных режимов работы электроискровой установки (скважность тока, частота следования тока), подбор материалов электрода (учитывать химический состав электродов).

Величина длительности импульсов  $\tau_{\text{имп}}$  – это время длительности импульса электрического разряда за определенный промежуток во времени. При электроискровом методе наращивания поверхностей металлов

продолжительность импульсов в зависимости от режима обработки поверхности составляет (5...195 мкс).

В импульсных системах обозначают:  $\tau_{п.ф}$  – передний фронт (нарастание) и  $\tau_{з.ф}$  – задний фронт (спад величины импульса). Повторение начала или окончания импульсов находят через его период промежутка  $T$  во времени по формуле (1).

$$T = \tau_u + \tau_{\pi} \quad (1)$$

где  $T$  – промежуток времени повторения начала и окончания импульса, в секундах - с;

$\tau_u$  – время действия импульса электрического тока, с;

$\tau_{\pi}$  – промежуток времени между двумя последовательными импульсами, с.

На рисунке 4 представлен разрядный импульс тока.

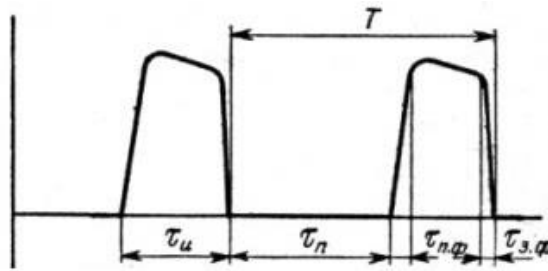


Рисунок 4 – Разрядный импульс тока

Скважность тока – это величина определяющая отношение периода импульсов к длительности импульса, скважность тока определяется величиной сконцентрированной энергии направленной от анода электрода к катод электроду.



Рисунок 5 – Скважность тока

**Результаты.** На основе экспериментальных исследований были получены следующие данные, Рисунки 6-7.

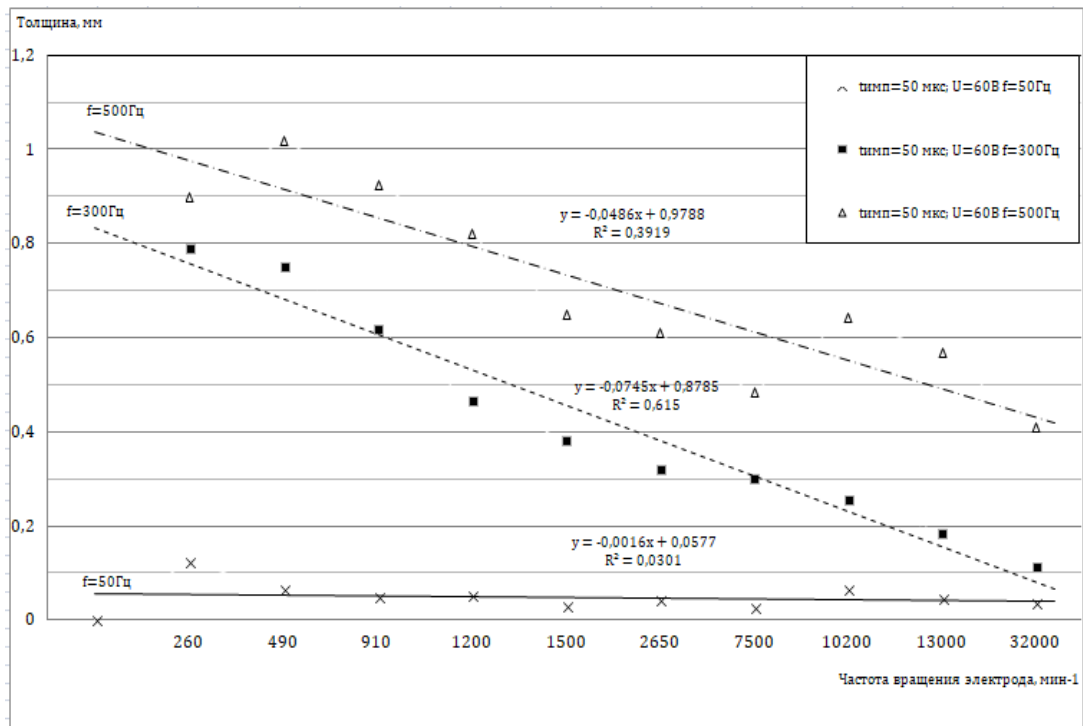


Рисунок 6 – Толщина покрытий в зависимости от заданных режимов обработки и изменений частоты вращения электрода при  $t_{\text{имп}}=50$  мкс;  $U=60$  В

По рисунку 6 видно, что при скважности тока равным  $t_{\text{имп}}=50$  мкс;  $U=60$  В,  $f=500$  Гц на частоте вращения электрода  $n=490$  об/мин<sup>-1</sup>, толщина электроискрового наращивания максимальна и она соответствует 1,04мм. Наибольшая толщина на данных участках сопровождается тем, что параметр частоты тока оказывает наибольшее влияние на температурный режим

нагрева наплавляющего электрода. Как видно из графиков повышение параметра частоты тока способствует повышению нагрева анод электрода, вследствие чего происходит более интенсивный перенос (отложение) электродного материала. Электроэрозионное разрушение частиц в данном случае с увеличением параметра частоты тока происходит в более интенсивной форме. Наименьшая толщина электроискровой обработки, как видно из графика формируются при малых значениях частоты тока  $f=50$  Гц. Дальнейшее увеличение числа оборотов электрода, приводит к спаду формируемой толщины, связано это с тем, что электрическая искра подвергается быстрому охлаждению и стачиванию (с увеличением скоростей вращения электрода). В результате охлаждения, вершины образуемого электроискрового слоя не успевают создать достаточное количество контактов и заметно вырасти (с коалисцировать) с материалом пластины Ст3. Однако следует заметить, что при частоте вращения электрода  $n=10200$  мин<sup>-1</sup> и при частоте тока  $f=500$  Гц, с увеличением частоты вращения электрода толщина электроискрового покрытия выше, чем при частоте вращения электрода  $n=7500$  мин<sup>-1</sup> при той же самой частоте тока  $f=500$  Гц. Связано это с тем, что на данных режимах обработки, наплавляющий электрод был коротким, при  $n=10200$  мин<sup>-1</sup> и при частоте тока  $f=500$  Гц, в результате которого анод электрод обладал меньшим сопротивлением (укороченный анод электрод в размере) в процессе электроискрового воздействия наблюдался более высокий нагрев кончика электрода.

На рисунке 7, представлен график изменения толщины электроискровых покрытий в зависимости от заданных режимов обработки и изменений частоты вращения электрода при скважности тока  $t_{имп}=100$  мкс;  $U=60$  В.

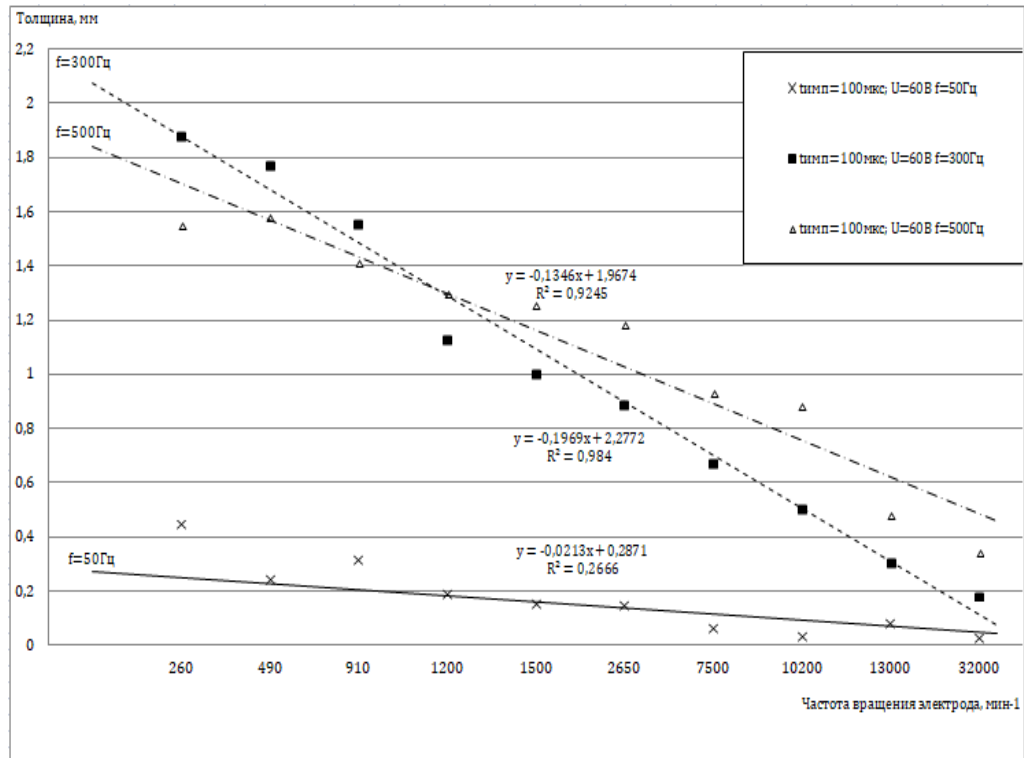


Рисунок 7 – Толщина покрытий в зависимости от заданных режимов обработки и изменений частоты вращения электрода при  $t_{\text{имп}}=100$  мкс;  
 $U=60\text{ В}$

По рисунку 7 видно, что при  $t_{\text{имп}}=100$  мкс;  $U=60$  В,  $f=300$  Гц на частоте вращения электрода  $n=260$  об/мин<sup>-1</sup>, толщина электроискрового наращивания максимальна и она =1,88 мм. Отметим, что при малых значениях частоты вращения электрода,  $n =260, 490, 910$  мин<sup>-1</sup>, при частоте тока  $f=300$  Гц, толщина электроискрового наращивания немного больше, чем при частоте тока  $f=500$  Гц при одинаковых значениях скорости вращения. Однако в полученных результатах нет статически значимой разницы, так как в последующем на графике наблюдается увеличение толщины покрытий при аналогичной частоте тока  $f=500$  Гц при увеличении частот вращения электрода свыше  $910$  мин<sup>-1</sup> по отношению к частоте тока  $f=300$  Гц [8]. В остальном зависимости толщины покрытия от частоты вращения электрода сходится с рисунком 6, здесь аналогично наблюдается понижения формирования толщины слоя электроискрового покрытия с увеличением частоты вращения электрода. Незначительными исключениями являются: частота тока  $f=500$  Гц при частоте вращения электрода  $n =490$  мин<sup>-1</sup> и частота

тока  $f=50\text{Гц}$  при частоте вращения электрода  $n=910\text{ мин}^{-1}$ . В первом случае при  $f=500\text{Гц}$  и частоте вращения  $n=490\text{ мин}^{-1}$  показатель толщины незначительно увеличивается с увеличением частоты вращения оборотов электрода по отношению к частоте вращения  $n=260\text{ мин}^{-1}$  и соответствует увеличению на  $0,20\text{ мм}$ . Во втором случае при частоте тока  $f=50\text{ Гц}$  и частоте вращения  $n=910\text{ мин}^{-1}$ , толщина покрытия также незначительно увеличивается по отношению к  $n=490\text{ мин}^{-1}$ , что соответствует увеличению на  $0,85\text{ мм}$ . Данные результаты не соответствуют ранее описанной нами гипотезе об уменьшении толщины электроискровых покрытий на заданных режимах обработки в зависимости от увеличения скорости вращения электрода и как следствие являются исключениями. Отклонения, по-видимому, связаны с человеческими факторами, к которым относятся: удельная длительность электроискрового воздействия на деталь, угол наклона  $\alpha^\circ$  направления электрода в процессе электроискрового наращивания и незначительная погрешность сделанных измерений. Следует так же отметить, что увеличение показателя скважности тока  $t_{\text{имп}}$  в 2 раза с  $50\text{ мкс}$  до  $100\text{ мкс}$  способствовало увеличению толщины слоя электроискрового наращивания на  $0,84\text{ мм}$ , для определения увеличения толщины покрытий использовали наибольшие значения полученных результатов по толщинам образующих покрытий (рисунок 7) с вычетом наибольшего значение образуемых толщин (рисунок 6), что соответствует числовым значениям  $1,88\text{ мм} - 1,04\text{ мм} = 0,84\text{ мм}$ .

На рисунке 8 представлены полученные образцы электроискровых покрытий.



а

б

в

Рисунок 8 – Электроискровые покрытия полученные в зависимости от различной скорости вращения электрода и параметров электроискровой установки

а – скорость вращения  $n=260 \text{ мин}^{-1}$ ; б - скорость вращения  $n=910 \text{ мин}^{-1}$ ;  
в - скорость вращения  $n=10200 \text{ мин}^{-1}$

**Вывод:** В результате проведенных экспериментальных исследований, были получены данные зависимости влияния скорости вращения электрода на толщину и шероховатость электроискровых покрытий при различных режимах обработки. Максимальная толщина электроискрового наращивания получена на режимах:  $t_{\text{имп}}=100 \text{ мкс}$ ,  $U=60 \text{ В}$ ,  $f=300 \text{ Гц}$  на частоте вращения электрода  $n=260 \text{ мин}^{-1}$  и она = 1,88 мм. Увеличение показателя скважности тока  $t_{\text{имп}}$  с 50 мкс до 100 мкс, способствует увеличению толщины электроискрового наращивания на 0,84 мм. В ходе исследований было установлено, что параметр частоты тока оказывает наибольшее влияние на температурный режим нагрева наплавляющего электрода, электроэрозионное разрушение капле/частиц электрической искры с увеличением параметра частоты тока происходит в более интенсивно - сильной форме. При коротком электроде наблюдается, более высокий нагрев кончика электрода, который связан с меньшим его сопротивлением. Наименьшие толщины электроискрового наращивания формируются при малых значениях частоты тока при  $f=50 \text{ Гц}$  и варьируются в пределах от 0,05 мм до 0,41 мм. Электроискровая обработка металлических поверхностей представляет собой сложный физико-химический процесс, в котором человеческий фактор имеет



большое значение в формировании структур слоев электроискровых покрытий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Формирование структуры слоя на металлах и сплавах при электроискровой обработке / С.Н. Химухин, Ри Хосен, А.Д. Верхотуров, Э.Х. Ри. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2010. – 240 с.

2. Коротаяев, Д. Н. Управление активационно-диссипативными процессами при электроискровом легировании стальной поверхности / Д. Н. Коротаяев, Е. В. Иванова // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 6. – С. 81-84.

3. Лазаренко Б.Р. Некоторые научные проблемы электрической эрозии материалов. // Электронная обработка материалов. 1969. -№ 2. С. 7-11.

4. Иванов В.И., Гришко А.А. Электроискровая установка “БИГ-5” для универсального применения при упрочнении и восстановлении деталей и инструментов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. -№ 6. – С. 20-23.

5. Власенко В.Д., Иванов В.И., Аулов В.Ф., Коневцев Л.А., Мартынова Е.Г., Хасан И.Х. Моделирование теплового поля поверхности при электроискровом легировании металлов // Инженерные технологии и системы – 2019. – Т. 29. - № 2. – С. 218-233.

6. Fridman A. Partial differential equations of parabolic type. – R.E. Krieger Pub. Co. – 1983.

7. Vitureanu, Petrica & Perju, Manuela & Achitei, Dragos & Nejneru, Carmen. (2018). Advanced Electro-Spark Deposition Process on Metallic Alloys. Режим доступа - [https://www.researchgate.net/publication/328963201\\_Advanced\\_Electro-Spark\\_Deposition\\_Process\\_on\\_Metallic\\_Alloys/](https://www.researchgate.net/publication/328963201_Advanced_Electro-Spark_Deposition_Process_on_Metallic_Alloys/) (дата обращения: 10.01.2023). – Текст: электронный.

8. Шаталов К.В., Кириллова А.В. Применение критерия Стьюдента для оценки результатов межлабораторных сравнительных испытаний. Эталоны. Стандартные образцы. 2016;(1):42-49. Режим доступа - [https://www.rmjournal.ru/jour/article/view/82?locale=ru\\_RU/](https://www.rmjournal.ru/jour/article/view/82?locale=ru_RU/) (дата обращения: 14.01.2023). – Текст: электронный.

### **Сведения об авторах**

Тухватуллин Олег Евгеньевич, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», г. Уфа, Россия. e-mail: bor4i4@rambler.ru.

Сайфуллин Ринат Назирович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии материалов и реновации машин ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», г. Уфа, Россия. e-mail: bashagregat@mail.ru.

### **Author`s personal details**

Tykhvatullin Oleg Evgenievich, student, Bashkortostan State Agrarian University, Ufa, Russian Federation. . e-mail: bor4i4@rambler.ru

Sayfullin Rinat Nazirovitch, doctor of technical sciences, professor, Bashkortostan State Agrarian University, Ufa, Russian Federation. e-mail: bashagregat@mail.ru.