

УДК 621.792.4

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ  
ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
ИМПЛАНТАТОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ  
ФОРМИРОВАНИЕ НА НЕЙ РЕГУЛЯРНОГО  
МИКРОРЕЛЬЕФА**

**М. Г. КИСЕЛЕВ, А. В. ДРОЗДОВ, С. Г. МОНИЧ, А. А. ДОСТА**

*Учреждение образования «Белорусский национальный  
технический университет», г. Минск*

**Введение**

В технологии изготовления металлических имплантатов важным заключительным этапом является операция модификации их поверхностей с целью придания им такого микрорельефа, параметры которого обеспечивают наибольший уровень прочностных и биомеханических показателей при их взаимодействии с тканями организма. В настоящее время для этого в основном используется пескоструйная, гидроабразивная и дробеструйная обработка поверхности имплантатов [1]. Характерным для них является то, что получаемая на обработанной поверхности шероховатость имеет произвольное направление неровностей. Однако эти способы обработки имеют ограниченные технологические возможности с точки зрения формирования шероховатости модифицированной поверхности с большими значениями ее высотных и шаговых параметров, а также не позволяют получать поверхности с регулярным микрорельефом. По этой причине на сегодня недостаточно изученными остались вопросы влияния таких значений указанных параметров шероховатости модифицированной поверхности металлических имплантатов на их эксплуатационные показатели.

Для получения таких данных, в первую очередь, необходимо определить рациональный способ модификации поверхности, обеспечивающий формирование на ней шероховатости с широким диапазоном варьирования ее высотных и шаговых параметров, а также получения на ней регулярного микрорельефа.

С учетом данных требований, а также анализа технологических возможностей по их обеспечению, было предложено осуществлять модификацию поверхности металлических имплантатов путем ее электроконтактной обработки (ЭКО) [1]–[3], которая представляет собой разновидность электроэрозионной обработки.

В этом случае удаление металла с обрабатываемой поверхности происходит за счет явления электрической эрозии – направленного разрушения токопроводящих материалов в результате кратковременного теплового действия импульсных электрических разрядов между инструментом и заготовкой в жидкой диэлектрической среде. На поверхности заготовки образуются характерные углубления (лунки), и она приобретает кратерообразный вид с явно выраженными углублениями в виде множества перекрывающихся друг друга лунок.

Очевидно, чтобы придать лункам регулярный характер расположения на обрабатываемой поверхности и исключить их перекрытие, необходимо обеспечить управляемое воздействие на нее электрических разрядов. Решить эту задачу можно при использовании электрода-инструмента, размеры и форма рабочей поверхности кото-

рого гарантирует неизменное на ней место протекания электрических разрядов, т. е. когда в процессе обработки место расположения минимального межэлектродного промежутка (МЭП), при котором происходит его пробой, остается на поверхности инструмента постоянным. При выполнении этого условия требуемый характер расположения лунок на обрабатываемой поверхности можно достаточно легко обеспечить за счет ее управляемого перемещения относительно электрода-инструмента.

Именно эти лунки формируют регулярный микрорельеф поверхности и характеризуют ее шероховатость.

Как установлено результатами предшествующих исследований [4], в наибольшей степени указанному требованию соответствует тонкий (диаметром 0,35 мм) проволочный электрод-инструмент, который в процессе ЭКО обеспечивает постоянное положение лунок на обрабатываемой поверхности. Кроме того, при прочих равных условиях применение проволочного электрода-инструмента по сравнению с роликовым и плоским обеспечивает большую степень влияния на условия формирования единичного следа обработки и его параметры, что является достоинством такого инструмента.

В отличие от размерной электроэрозионной обработки, когда основным технологическим показателем является интенсивность съема припуска с заготовки, в данном случае таким показателем является получение заданных параметров регулярного микрорельефа модифицированной поверхности, которые формируются в результате воздействия на нее серии электрических импульсов. Для решения этой задачи необходимо располагать данными, отражающими связь между параметрами микрорельефа модифицированной поверхности и режимами ее электроконтактной обработки с использованием проволочного электрода-инструмента. Определению этих зависимостей посвящена данная работа.

### Методика проведения исследований

На рис. 1 представлена технологическая схема ЭКО цилиндрической поверхности образца металлического имплантата с использованием проволочного электрода-инструмента.

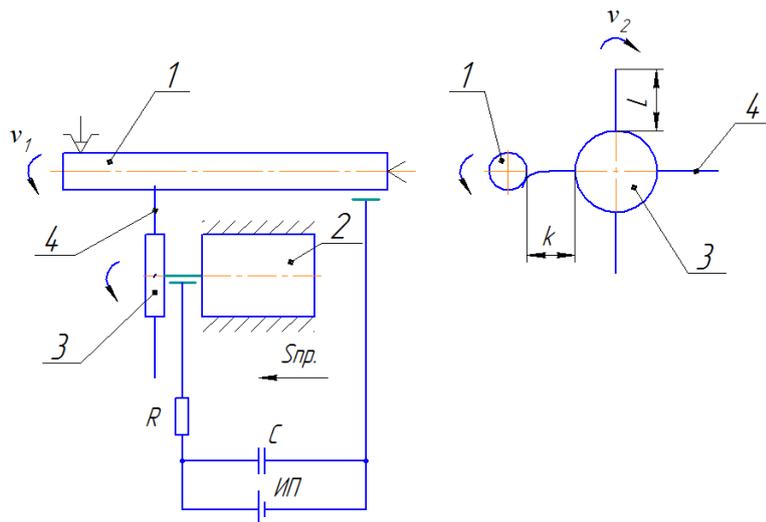


Рис. 1. Технологическая схема ЭКО цилиндрической поверхности образца металлического имплантата с использованием проволочного электрода-инструмента

Одним концом обрабатываемый цилиндрический образец 1 закрепляется в цанговом патроне станка, а с противоположной стороны поджимается неподвижным

центром. От привода станка он получает равномерное вращательное движение вокруг своей оси с частотой  $n_{об}$ . На поперечном суппорте станка смонтирован электродвигатель постоянного тока 2, корпус которого электрически от него изолирован. На валу электродвигателя неподвижно посажена оправка 3, в которой консольно закреплены проволочные электроды-инструменты 4, имеющие свободную длину  $L$ . Предварительно, за счет регулировочных перемещений электродвигателя в поперечном направлении, он устанавливается в положение, при котором взаимодействие обрабатываемой поверхности образца с вращающимся проволочным элементом протекает в условиях упругого деформирования последнего. Наибольшее значение этой деформации определяется величиной предварительно установленного натяга  $\delta = L - k$ . Для обработки цилиндрической поверхности образца на всю требуемую длину электродвигателю с закрепленными на его валу инструментами сообщается продольная подача  $S_{пр}$ .

Электрическая схема включает в себя источник питания постоянного тока ИП, накопительный конденсатор  $C$ , включенный параллельно контактирующим поверхностям проволочного электрода-инструмента и образца, а также последовательно подключенного им токоограничивающего резистора  $R$ . При вращении электродов-инструментов они, периодически взаимодействуя с поверхностью образца, вызывают прерывание электрической цепи, что сопровождается возникновением электрических разрядов. В результате их действия происходит удаление металла с поверхности образца с формированием на ней характерных лунок, совокупность которых определяет микрорельеф модифицированной поверхности.

Очевидно, что параметры получаемого регулярного микрорельефа, т. е. размеры лунок и характер их расположения на модифицированной поверхности, определяются режимами ее ЭКО. В рассматриваемом случае основными параметрами режима ЭКО являются: напряжение  $U$  и емкость  $C$  накопительного конденсатора; время прохождения электрического импульса  $\tau_{и}$ ; частота вращения обрабатываемого образца  $\nu_1$  диаметром  $d$ ; частота вращения проволочного электрода-инструмента  $\nu_2$ ; количество инструментов в оправке  $Z$ , а также продольная подача  $S_{пр}$ .

Предварительными исследованиями установлено, что время электрической эрозии оказывается значительно меньшим, чем время механического взаимодействия, и поэтому им можно пренебречь при расчете параметров регулярного микрорельефа. В то же время параметры регулярного микрорельефа не зависят от частоты вращения электрода-инструмента, т. е. от частоты импульсов, и не зависят от величины натяга  $\delta$ .

Для установления и математического описания зависимостей, отражающих влияние указанных режимов ЭКО, цилиндрической поверхности образца проволочным электродом-инструментом на параметры ее регулярного микрорельефа примем следующие допущения. Так, формируемые лунки имеют сферическую форму радиусом  $R_{л}$  и глубиной  $h_{л}$  [5]. Все лунки, получаемые при неизменных значениях напряжения накопительного конденсатора  $U$  и его емкости  $C$ , имеют для данного обрабатываемого металла одинаковые размеры. Для количественной оценки взаимного расположения лунок на обработанной поверхности воспользуемся коэффициентом перекрытия:

$$\beta = \frac{l}{d_{л}},$$

где  $l$  – расстояние между центрами лунок;  $d_{л}$  – диаметр лунки. С учетом сделанных допущений на рис. 2 схематично показано поперечное сечение образца с расположенными на его обработанной поверхности лунками.

Глубину лунки  $h_{л}$  (мкм), получаемой на поверхности заготовки в результате действия единичного электрического импульса, можно рассчитать по следующей формуле [4]:

$$h_{л} = kA_{и}^p, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, определяемый экспериментально и зависящий от режима обработки, материала электродов, их размера, вида и состояния рабочей среды. Так, на чистовых режимах при обработке твердых сплавов  $k = 1-5$ , при обработке сталей  $k = 2-12$ , на черновых режимах  $k = 10-50$ ;  $p$  – показатель степени, характеризующий форму лунки, и в расчетах принимают  $p = \frac{1}{3}$ ;  $A_{и}$  – энергия импульса, которая в данном случае определяется как электрическая энергия, запасенная на накопительном конденсаторе:

$$A_{и} = \frac{CU^2}{2}, \quad (2)$$

где  $C$  – емкость накопительного конденсатора;  $U$  – напряжение на нем.

Чтобы рассчитать глубину лунки, необходимо определить численные значения коэффициента  $k$ , соответствующие конкретным условиям обработки данной металлической поверхности. Для этого, согласно методике, изложенной в работе [7], были проведены эксперименты по определению параметров одиночных лунок, полученных на полированной поверхности образцов при однократном взаимодействии с ней проволочного электрода-инструмента при известных значениях  $C$  и  $U$ . Полученные результаты представлены в таблице.

**Значения диаметра лунки  $d_{л}$  и ее глубины  $h_{л}$  в зависимости от напряжения накопительного конденсатора  $U$  при различных условиях обработки поверхности титанового и стального образцов**

Обрабатываемый материал образца	Напряжение накопительного конденсатора $U$ (В) при его емкости $C = 150$ мкФ	Условия обработки					
		с дистиллированной водой			на воздухе		
		$d_{л}$ , мкм	$h_{л}$ , мкм	$h_{л}/d_{л}$	$d_{л}$ , мкм	$h_{л}$ , мкм	$h_{л}/d_{л}$
Титановый сплав ВТ1-0	40	370	17	0,046	426	22	0,052
	60	425	21	0,049	483	28	0,058
	80	460	24	0,052	594	38	0,064
	100	580	28	0,048	750	45	0,060
Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	40	395	18	0,046	490	26	0,053
	60	433	21	0,048	500	30	0,060
	80	490	27	0,055	640	41	0,064
	100	585	32	0,055	775	45	0,058

Из анализа этих данных следует, что с увеличением напряжения накопительного конденсатора как глубина, так и диаметр получаемой на поверхности образца одиночной лунки нелинейно возрастают. Объясняется это соответствующим повышением энергии единичного импульса, что сопровождается увеличением объема удален-

ного с поверхности образца металла, а следовательно, и размеров получаемой на ней лунки. При неизменном значении напряжения накопительного конденсатора, т. е. при постоянной энергии импульса, размеры лунок, получаемых на поверхности стального образца, оказываются больше, чем на поверхности титанового образца. Такое положение связано с более низкой температурой плавления и испарения стального образца, чем титанового. Во всех случаях использование диэлектрической жидкости (дистиллированная вода) приводит к уменьшению по сравнению с обработкой на воздухе размеров получаемых лунок. Данная ситуация объясняется тем, что в последнем случае интенсивность теплового воздействия на поверхность образца оказывается выше по сравнению с обработкой при использовании диэлектрической жидкости, чем обуславливается большой объем удаленного с поверхности металла с формированием лунок большего размера.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что значение коэффициента  $k$  в выражении (1) зависит от теплофизических свойств обрабатываемого металла, а также от наличия и свойств диэлектрической жидкости. Зная экспериментально полученные значения глубины лунки  $h_{л}$  при известных величинах  $C$  и  $U$ , были рассчитаны значения коэффициента  $k$  при электроконтактной обработке титанового сплава и нержавеющей стали как с применением дистиллированной воды, так и без нее. В результате были получены следующие значения коэффициентов  $k$ : при обработке с использованием дистиллированной воды  $k = 30-35$ , при обработке на воздухе  $k = 40-45$  – для титановых образцов, а для стальных образцов –  $k = 34-36$ , при обработке с использованием дистиллированной воды  $k = 50-52$ .

По заданному диаметру лунки  $d_{л}$ , который необходимо обеспечить на обрабатываемой поверхности, используя известную величину отношения  $h_{л}/d_{л}$ , определяют соответствующую условиям обработки глубину лунки  $h_{л}$ . Затем, зная численное значение, напряжение накопительного конденсатора, при котором обеспечивается формирование лунок требуемой глубины, а соответственно, и их диаметра.

Так, чтобы диаметр лунок составлял  $d_{л} = 460$  мкм, искомое значение  $U$  определяется из выражения (1):

$$U = \sqrt{\frac{2}{C} \left( \frac{h_{л}}{k} \right)^3}.$$

С учетом того, что  $C = 150$  мкФ,  $h_{л}/d_{л} = 0,05$  при обработке титанового образца с применением дистиллированной воды, значение напряжения накопительного конденсатора составляет  $U = 80$  В.

В процессе ЭКО образца металлического имплантата должно соблюдаться важное условие: образующиеся следы обработки (лунки) не должны перекрывать друг друга, а расстояние между ними должно находиться в пределах  $x_1 = 1,0-1,5d_{л}$  (коэффициент перекрытия лунок).

При этом величина центрального угла, соответствующая двум рядом расположенным лункам, составит (рис. 2):

$$\varphi_1 = \frac{x_1}{R_1},$$

где  $R_1$  – радиус образца металлического имплантата.

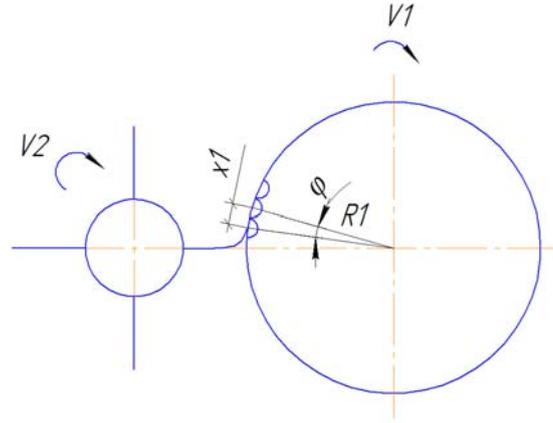


Рис. 2. Геометрические параметры однократного взаимодействия проволочного электрода-инструмента с обрабатываемым образцом

Для расчета величины угла начала механического взаимодействия проволочного элемента и образца рассмотрим схему, приведенную на рис. 3.

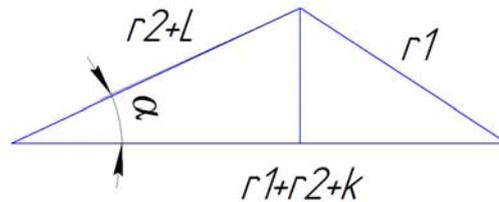


Рис. 3. К расчету величины угла начала механического взаимодействия

Откуда видно, что длинная сторона образовавшегося треугольника имеет длину, равную межосевому расстоянию между электродом-инструментом и образцом, и составляет:

$$b = r_1 + r_2 + L,$$

где  $r_2$  – радиус оправки электрода-инструмента.

Тогда угол начала механического взаимодействия рассчитывается по теореме косинусов для треугольника:

$$\cos \alpha = \frac{(r_2 + L)^2 + (r_1 + r_2 + k)^2 - r_1^2}{2(r_2 + L)(r_1 + r_2 + k)}.$$

С учетом этого время механического взаимодействия определяется как

$$t = 2 \frac{\alpha}{\omega} = 2 \frac{\alpha}{2\pi v_{\text{отн}}},$$

где  $v_{\text{отн}}$  – частота вращения электрода-инструмента относительно образца и для случая встречной обработки  $v_{\text{отн}} = v_1 + v_2$ .

Для определения частоты вращения электрода-инструмента  $v_2$  определим время  $t_1$ , за которое обрабатываемый образец поворачивается на угол  $\phi_1$  при его заданной частоте вращения  $v_1$ :

$$t_1 = \frac{\varphi_1}{2\pi\nu_1}. \quad (3)$$

За это же время электрод-инструмент должен повернуться на величину угла, равного углу между соседними проволочными элементами. В данном случае время определяется по следующей формуле:

$$t_2 = \frac{\varphi_2}{2\pi\nu_2} = \frac{2\pi}{2\pi\nu_2 Z}. \quad (4)$$

Приравняв равенства (3) и (4), определим искомое значение частоты вращения электрода-инструмента  $\nu_2$ :

$$\nu_2 = \frac{2\pi R_1}{Zx_1} \nu_1.$$

Время полного однократного взаимодействия проволочного элемента состоит из механической составляющей, рассчитанной выше, и электрической, которая оказывается на несколько порядков меньше, чем первая, поэтому ее величиной будем пренебрегать.

Для того чтобы полностью обработать одну дорожку, которая представлена вертикальным рядом лунок, показанных на развертке (рис. 4), необходимо подсчитать количество этих лунок:

$$N = \frac{2\pi}{\varphi_1} = \frac{2\pi r_1}{x_1}.$$

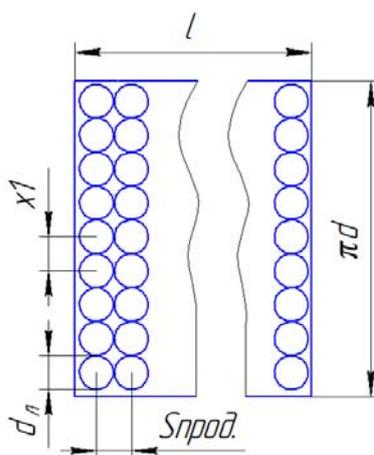


Рис. 4. Развертка поверхности образца металлического имплантата

С учетом этого время обработки одной дорожки составит:

$$t_{\text{дор}} = N \frac{t}{Z},$$

где  $Z$  – количество проволочных элементов.

Тогда продольную подачу электрода-инструмента определим по формуле

$$S_{\text{прод}} = x_1 \frac{1}{t_{\text{дор}}}, \text{ мм/с},$$

а суммарное время обработки всей поверхности образца равно:

$$t_{\Sigma} = x_1 \frac{l}{t_{\text{дор}}},$$

где  $l$  – длина образца металлического имплантата.

Для определения поперечной подачи электрода-инструмента рассчитаем длину проволоки, испарившейся за время однократного взаимодействия:

$$l = \frac{CU^2}{2\rho L_{\text{исп}} \frac{\pi d_{\text{инстр}}^2}{4}},$$

где  $L_{\text{исп}}$  – коэффициент испарения материала проволочного элемента;  $d_{\text{инстр}}$  – диаметр проволочного электрода-инструмента.

Тогда поперечная подача определяется как

$$S_{\text{поп}} = \frac{CU^2}{2\rho L_{\text{исп}} \frac{\pi d_{\text{инстр}}^2}{4}} v_2, \text{ мм/с.}$$

Следует отметить, что ЭКО цилиндрической поверхности металлического образца может проводиться как по схеме обработки отдельной дорожки с последующим шаговым перемещением на следующую дорожку, при этом величина шага равна коэффициенту перекрытия лунок, т. е. продольная подача изменяется ступенчато, так и по схеме с непрерывной подачей, при которой лунки на поверхности металлического образца формируются по винтовой линии.

### Заключение

1. Обоснована перспективность использования электроконтактной обработки поверхности металлических имплантатов с использованием проволочного электрода-инструмента, которая по сравнению с традиционно применяемыми способами (пескоструйная, гидроабразивная, дробеструйная) позволяет формировать на ней шероховатость с большими значениями высотных и шаговых параметров, а также получать поверхности с регулярным микрорельефом, что свидетельствует о широких технологических возможностях предлагаемого способа поверхностной обработки металлических имплантатов с целью повышения их биомеханических показателей.

2. На основании анализа экспериментальных данных, отражающих влияние напряжения накопительного конденсатора на глубину и диаметр лунок, получаемых при однократном взаимодействии проволочного электрода-инструмента с полированной поверхностью металлических образцов, получены следующие новые результаты:

– определены численные значения коэффициента, связывающего значение глубины лунки с величиной энергии импульса при электроконтактной обработке титанового (ВТ1-0) и стального (Сталь 12Х18Н10Т) образцов как с использованием дистиллированной воды, так и при обработке на воздухе;

– установлено, что с повышением энергии импульса, в частности, напряжения накопительного конденсатора  $U$  при постоянной его емкости  $C$ , глубина лунки  $h_{\text{л}}$  и ее диаметр  $d_{\text{л}}$  нелинейно увеличиваются, но при этом их отношение  $h_{\text{л}}/d_{\text{л}}$  для данного обрабатываемого материала и конкретных условий выполнения электроконтактной обработки остается практически постоянным.

3. С учетом установленных зависимостей определена методика и последовательность назначения электрических параметров режима электроконтактной обработки, включающая выполнение следующих процедур и расчетов. По заданному диаметру лунки  $d_{л}$ , который необходимо обеспечить на обрабатываемой поверхности, используя известную величину отношения  $h_{л}/d_{л}$ , определяют соответствующую условиям обработки глубину лунки  $h_{л}$ . Затем, зная численную величину коэффициента  $k$  и емкость конденсатора  $C$ , вычисляют значение напряжения накопительного конденсатора, при котором обеспечивается формирование лунок требуемой глубины, а соответственно, и их диаметра.

4. Исходя из анализа кинематики принятой технологической схемы электроконтактной обработки цилиндрической поверхности образцов проволочным электродом-инструментом, состоящим из  $Z$  отдельных элементов, получены зависимости, позволяющие рассчитать частоту его вращения  $\nu_1$ , продольную подачу  $S_{\text{прод}}$  и частоту вращения образца  $\nu_2$  диаметром  $d$ , обеспечивающие формирование на его поверхности регулярного микрорельефа с заданным коэффициентом перекрытия лунок диаметром  $d_{л}$ .

### Литература

1. Димитрович, Д. А. Изучение влияния физических методов обработки поверхности титана на рост колоний клеток-предшественников костной ткани / Д. А. Димитрович, В. А. Иванов // Приклад. физика. – 2009. – № 2. – С. 35–43.
2. Киселев, М. Г. Исследование явления переноса материала с инструмента на обрабатываемую поверхность имплантата при его электроконтактной обработке с ультразвуком / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. А. Борисов // Современ. методы и технологии создания и обработки материалов : материалы 7 Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2012. – С. 88–93.
3. Теоретическое обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 3–10.
4. Киселев, М. Г. Влияние электроконтактной обработки с ультразвуком на параметры поверхностей титановых имплантов / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. А. Борисов // Современ. методы и технологии создания и обработки материалов : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2011. – С. 129–136.
5. Киселев, М. Г. Применение электроконтактной виброударной обработки для модификации образцов титановых имплантов / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, В. А. Борисов // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. междунар. симп. – Минск, 2011. – С. 53–57.
6. Модификация поверхности титановых имплантов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах / В. В. Савич [и др.] ; науч. ред. В. В. Савич. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 244 с.
7. Особенности формирования следов обработки на поверхности титанового образца при однократном электроконтактном воздействии на нее проволочным электродом-инструментом / М. Г. Киселев [и др.] // Наука и техника. – 2013. – № 2. – С. 29–35.