

Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю., Минченя В.Т., Нисс В.С.

ПОЛУЧЕНИЕ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ИЗДЕЛИЯХ МАЛОГО ДИАМЕТРА МЕТОДОМ РАЗМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Для решения проблемы формообразования конических изделий малого диаметра разработан новый метод на основе размерной электролитно-плазменной обработки (ЭПО), который заключается в непрерывном выдвигении цилиндрической заготовки из электролита с переменной скоростью. Исследованы особенности съема металла в процессе формирования конических поверхностей методом размерной ЭПО, разработана методика расчета закономерности выдвигения цилиндрической заготовки из электролита для получения конической поверхности с заданными параметрами, учитывающая диаметр заготовки и технологические параметры процесса ЭПО. На основании результатов проведенных исследований разработаны процессы формообразования конических поверхностей стоматологических наконечников диаметром 0,2 – 1,0 мм и длиной рабочей части 14 – 21 мм, применяемых для ультразвукового уплотнения пломбировочного материала при пломбировании корневых каналов зуба.

Введение. Традиционные методы получения конических поверхностей включают механическую обработку (точение, шлифование) [1], поперечно-клиновую прокатку [2], и размерную электрохимическую обработку [3, 4]. Однако они не позволяют формировать конические поверхности на деталях малого диаметра (менее 1 мм) и на нежестких деталях, у которых отношение длины к поперечному размеру составляет 12 и более [5]. Например, шлифование в центрах или при консольном закреплении заготовки возможно только для жестких деталей. Процессы бесцентрового шлифования позволяют получать цилиндрические изделия диаметром до 0,2 мм, однако их применение для получения конических изделий малого диаметра сильно ограничено [6, 7]. Поперечно-клиновой прокаткой обеспечивается изготовление деталей диаметром от 2 до 120 мм [2]. Размерная электрохимическая обработка имеет следующие ограничения при обработке деталей малого диаметра: сложность изготовления электрода-инструмента, повторяющего форму конической поверхности, сложность прокачивания электролита через межэлектродный промежуток, а также невозможность обеспечения равномерного зазора по всей длине формируемой конической поверхности [3, 4]. Для решения проблемы формообразования конических поверхностей малого диаметра (менее 1 мм) предложен метод размерной электролитно-плазменной обработки (ЭПО).

ЭПО широко используется для полирования, глянцевого удаления заусенцев, скругления острых кромок. ЭПО обеспечивает снижение шероховатости поверхности на 2 – 3 класса, до $Ra = 0,04$ мкм. Метод также применяется для очистки поверхности, удаления заусенцев, скругления острых кромок. Обработку проводят при температуре электролита 75 – 90⁰С. Продолжительность обработки обычно составляет 3 – 5 мин [8]. ЭПО является экологически чистым процессом. Применение дешевых и безопасных для персонала и окружающей среды электролитов является основным преимуществом ЭПО перед классическим электрохимическим полированием [9]. В то же время изучение процесса показало, что при увеличении продолжительности ЭПО воз-

можно ее применение для точной размерной обработки деталей вращения [10], в том числе и для конических поверхностей. Съем металла с обрабатываемой поверхности происходит со скоростью до 0,6 мм/ч [11].

Формирование конических поверхностей электролитно-плазменной обработкой. Известно, что формирование конической поверхности обеспечивается в процессе ЭПО и без выдвигания заготовки из электролита [12] из-за разной толщины парогазовой оболочки вокруг поверхности по высоте. Однако при этом невозможно добиться контролируемой конусности формируемой поверхности. На основании анализа результатов исследований, проведенных в работе [11] на цилиндрических образцах диаметром от 2 до 10 мм можно сделать вывод о том, что конусность в зоне устойчивой парогазовой оболочки после обработки продолжительностью 120 мин при неподвижном размещении образца составляет от 7'26" до 11'28". С увеличением продолжительности обработки конусность увеличивается.

Новый метод формообразования конических поверхностей малого диаметра размерной ЭПО заключается в следующем (рис. 1.). Исходная цилиндрическая заготовка погружается в электролит и обрабатывается с непрерывным извлечением ее из электролита с переменной скоростью. При этом скорость подъема заготовки из электролита в процессе обработки зависит от диаметра заготовки, требуемых размеров формируемой конической поверхности и технологических параметров ЭПО, которые определяют в свою очередь скорость съема.

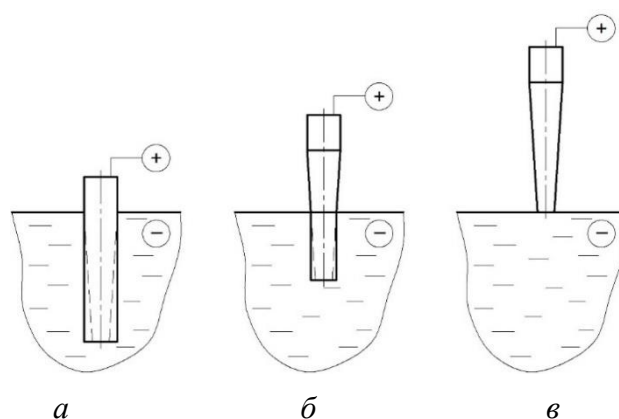


Рис. 1. Формирование конической поверхности методом размерной ЭПО: *а* – исходное состояние; *б* – промежуточная стадия; *в* – конечный результат

Реализация метода становится возможной при использовании механизма подъема заготовки с приводом от двигателя шагового типа, управляемого контроллером. Контроллер обеспечивает вращение двигателя по требуемому для формирования конкретной конической поверхности закону. Кроме того, шаговые двигатели обеспечивают малый угол перемещения (до 0,9°/шаг), что позволяет вести обработку с практически непрерывным подъемом заготовки из электролита с низкой скоростью. Это дает возможность избежать появления кольцевых канавок, образующихся на конической поверхности заготовки на границе электролит - воздух при статичной обработке или при ступенчатом подъеме заготовки.

Целью настоящей работы является исследование особенностей съема металла в процессе формирования конических поверхностей методом размерной ЭПО, а также разработка методики расчета закона выдвигания цилиндрической заготовки из электролита с целью получения конической поверхности с требуемыми параметрами.

Методы и оборудование. В качестве образцов при выполнении исследований использовались цилиндрические заготовки из стали 12Х18Н10Т диаметром 1 мм. Для ЭПО образцов использовалась экспериментальная установка, позволяющая регулировать

напряжение обработки в диапазоне от 0 до 300 В и обеспечивающая контроль и поддержание температуры электролита с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Обработка образцов выполнялась при температуре электролита 80°C и рабочем напряжении 270 В в 4% водном растворе сульфата аммония. Сила тока определялась с помощью токовых клещей UNIT-203. Плотность тока определялась как отношение силы тока к площади обрабатываемой поверхности. Изменение диаметра образца осуществлялось механическим микрометром с ценой деления 0,01 мм.

Результаты и обсуждение. Формирование конической поверхности в процессе размерной ЭПО осуществляется как за счет управляемого съема путем выдвигания заготовки из электролита, так и за счет самоорганизующегося распределения съема металла по высоте заготовки. Для оценки влияния самоорганизующегося распределения съема на формирование конических изделий малого диаметра размерной ЭПО выполнялась обработка цилиндрического образца диаметром 1 мм и длиной погруженной части 70 мм с продолжительностью, необходимой для достижения диаметра 0,2 – 0,25 мм. Для определения конусности через каждые 5 мин обработки измерялся диаметр образцов в пяти различных по высоте точках в зоне устойчивой парогазовой оболочки.

После обработки продолжительностью 60 мин диаметр нижней части образца составил 0,24 мм, а максимальная конусность – $1'01''$. Таким образом, полученные данные показывают несущественную неравномерность съема металла по высоте в процессе ЭПО цилиндрических поверхностей диаметром менее 1 мм. Установленная при этом величина конусности ничтожно мала и, например, при длине до 50 – 70 мм может не учитываться при расчете закона выдвигания цилиндрической заготовки из электролита при получении конической поверхности с требуемыми параметрами.

На рис. 2. представлена зависимость, демонстрирующая динамику изменения диаметра цилиндрического образца в процессе ЭПО. Из представленной зависимости видно, что съем металла в процессе ЭПО цилиндрической поверхности неравномерный и зависит от диаметра образца. С уменьшением диаметра образца плотность тока и, соответственно, интенсивность съема увеличивается. Зависимость плотности тока от диаметра образца, построенная на основании полученных экспериментальных данных, представлена на рис. 3. Из рисунка видно, что при уменьшении диаметра образца с 1,0 до 0,2 мм плотность тока увеличивается почти в два раза.

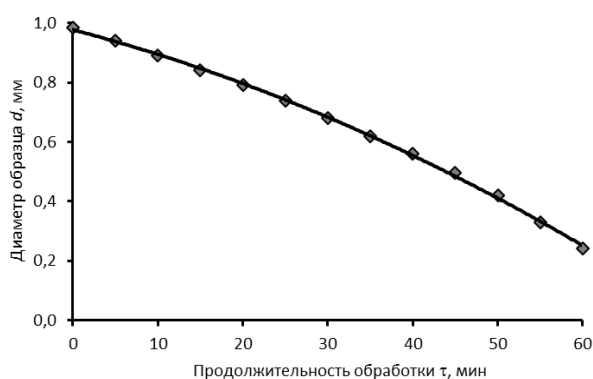


Рис. 2. Динамика изменения диаметра цилиндрического образца малого диаметра в процессе ЭПО

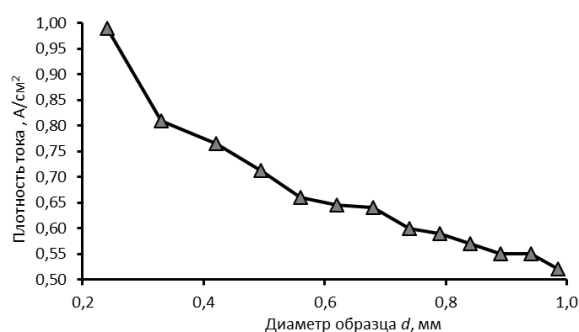


Рис. 3. Влияние диаметра образца на плотность тока в процессе ЭПО цилиндрического образца малого диаметра

Для расчета объемной скорости съема металла с цилиндрической поверхности в процессе ЭПО в работе [14] установлена формула:

$$v_{\text{цил}} = 2\pi r L k_v \eta_a \sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2\sigma}{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}, \quad (1)$$

где r – радиус кривизны цилиндрической поверхности, м;

L – длина цилиндра, м;

k_v – объемный электрохимический эквивалент вещества, м³/А·мин (для коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т равен $2,16 \cdot 10^{-9}$ м³/А·мин);

η_a – коэффициент выхода по току (экспериментально установленное значение – 0,43);

j_0 – эквивалентная плотность тока, А/м² (характеризует плотность тока на плоской поверхности при равных с цилиндрической поверхностью условиях обработки – температура электролита, рабочее напряжение, глубина погружения; при температуре электролита 80 °С, рабочем напряжении 270 В и глубине погружения 25 мм величина эквивалентной плотности тока составляет $j_0 = 2500$ А/м²);

k – коэффициент плотности тока, А/м (произведение плотности тока на толщину парогазовой оболочки на каждом участке обрабатываемой поверхности; является постоянной величиной для любого участка поверхности);

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

U – рабочее напряжение, В;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость парогазовой оболочки (принимается $\varepsilon = 1$);

ε_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-5}$ Ф/м).

При расчетах используется коэффициент $m = \frac{2 \cdot k^2 \cdot \sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}$, состоящий из постоянных величин. Его экспериментально установленное значение составляет $0,802 \cdot 10^9 \text{В}^4/(\text{Ом}^2 \cdot \text{м}^3)$.

Для расчета линейной скорости съема формула (1) приобретает вид:

$$v_{\text{цил}} = k_v \eta_a \sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2\sigma}{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}. \quad (2)$$

На основании экспериментальных данных, а также по результатам расчета с помощью формулы (2), построены зависимости, характеризующие влияние диаметра на скорость съема в процессе размерной ЭПО (рис. 4.). Анализ представленных зависимостей позволяет утверждать, что полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными.

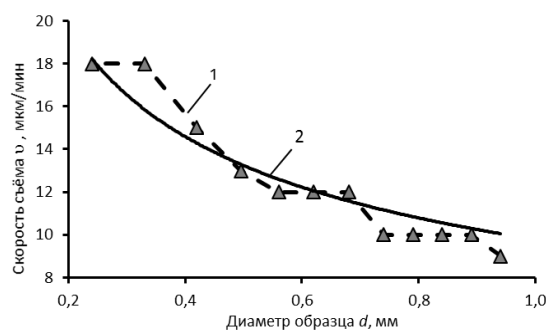


Рис. 4. Влияние диаметра образца на скорость съема в процессе ЭПО цилиндрического образца малого диаметра:

1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные

На рис. 5. представлена расчетная схема для определения закона вертикального перемещения цилиндрической заготовки из электролита для формирования конической поверхности с заданными параметрами.

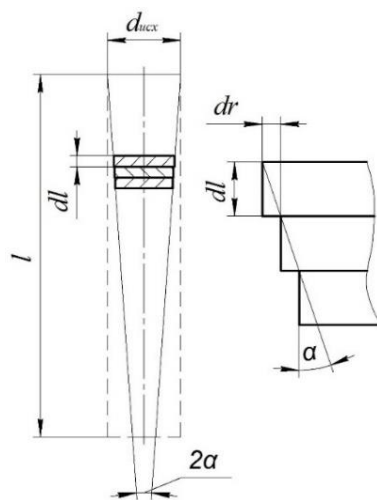


Рис. 5. Расчетная схема для определения закономерности вертикального перемещения цилиндрической заготовки из электролита для формирования конической поверхности с заданными параметрами

Формируемый из цилиндрической заготовки конус с общей высотой l с углом 2α можно разбить на множество цилиндрических элементов с бесконечно малой высотой dl . Полученные элементы имеют различный конечный радиус. Радиус последующего элемента меньше радиуса предыдущего элемента на величину dr . Поэтому продолжительность обработки dt , которая требуется для обеспечения необходимого съема металла для каждого элемента, также различна. Таким образом, скорость вертикального перемещения для каждого элемента составит:

$$v_{\text{верт}} = \frac{dl}{dt}. \quad (3)$$

Продолжительность обработки для съема металла с цилиндрической поверхности на величину dr составляет:

$$dt = \frac{dr}{v_{\text{цил}}}. \quad (4)$$

Тогда после подстановки (4) в (3), а также учитывая, что отношение $\frac{dr}{dl}$ представляет собой $\text{tg}\alpha$, выражение для определения скорости $v_{\text{верт}}$ для каждого элемента запишется как половина отношения скорости съема металла с цилиндрической поверхности $v_{\text{верт}}$ к тангенсу уклона формируемой конической поверхности (5). Таким образом, скорость подъема заготовки из электролита является величиной, прямо пропорциональной скорости съема металла с цилиндрической поверхности.

$$v_{\text{верт}} = \frac{v_{\text{цил}}}{2\text{tg}\alpha}. \quad (5)$$

Далее в работе на примере усеченного конуса с диаметрами оснований $d_{исх} = 0,98$ мм и $d_{кон} = 0,20$ мм длиной $l = 34$ мм приведен расчет закономерности вертикального перемещения заготовки. Для представления закономерности вертикального перемещения заготовки в виде зависимости, характеризующей изменение скорости $U_{верт}$ от координаты подъема y необходимо сперва установить зависимость $y(t)$. Для этого формируемый конус разбивается, например, на 17 равных по высоте элементов. Чем больше количество элементов, тем выше точность расчета. Далее с учетом угла уклона конуса рассчитывается радиус каждого элемента r_i . Общее время, необходимое для съема металла с цилиндра с исходным радиусом $r_{исх}$ до конечного радиуса r_i определяется с помощью интегрального выражения (6) согласно [14].

$$t_i = \frac{1}{k_v \eta_a} \int_{r_i}^{r_{исх}} \frac{dr}{\sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2 \sigma}{U^2 \epsilon \epsilon_0 r}}} \quad (6)$$

Затем по формуле (2) определяется скорость съема металла $U_{цилі}$ для каждого элемента конуса с учетом его радиуса r_i . Скорость подъема заготовки из электролита для каждого элемента $U_{верті}$ определяется по формуле (5). Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета закономерности вертикального перемещения заготовки

y_i , мм	r_i , мм	t_i , мин	$U_{цилі}$, мкм/мин	$U_{верті}$, мм/мин
0	0,490	0,00	9,95	0,43
2	0,467	4,57	10,14	0,44
4	0,444	9,05	10,35	0,45
6	0,421	13,44	10,57	0,46
8	0,398	17,73	10,81	0,47
10	0,375	21,92	11,08	0,48
12	0,352	26,01	11,37	0,50
14	0,329	29,99	11,70	0,51
16	0,306	33,85	12,06	0,53
18	0,284	37,60	12,47	0,54
20	0,261	41,21	12,93	0,56
22	0,238	44,69	13,47	0,59
24	0,215	48,02	14,08	0,61
26	0,192	51,20	14,82	0,65
28	0,169	54,21	15,70	0,68
30	0,146	57,04	16,79	0,73
32	0,123	59,67	18,18	0,79
34	0,100	62,08	20,03	0,87

Зависимость координаты подъема от продолжительности обработки $y_i(t)$, построенная на основании расчетных данных, приведена на рисунке 6 (зависимость 1). Из рисунка видно, что для формирования конической поверхности с требуемыми параметрами скорость вертикального перемещения цилиндрической заготовки должна постепенно увеличиваться при уменьшении диаметра. Для сравнения на рисунке также представлена зависимость вертикального перемещения заготовки с постоянной скоростью (зависимость 2).

Выполнение обработки по такой закономерности приводит к формированию поверхности с криволинейной образующей.

На рис. 7. представлена закономерность вертикального перемещения заготовки в виде зависимости, характеризующей изменение скорости $v_{\text{верт}}$ от координаты подъема y .

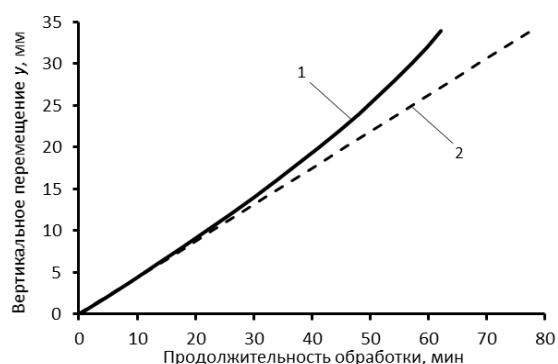


Рис. 6. Зависимость координаты подъема заготовки из электролита от продолжительности размерной обработки:
1 — на основании расчетных данных;
2 — постоянная скорость подъема

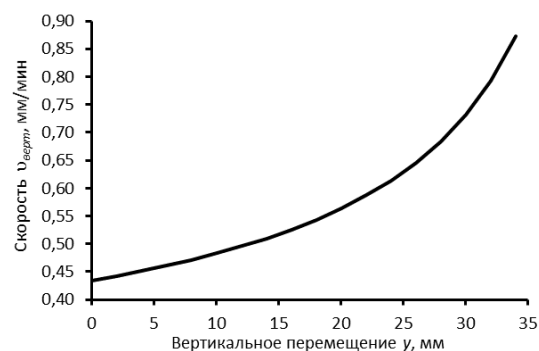


Рис. 7. Зависимость скорости вертикального перемещения от координаты подъема заготовки из электролита

На основании результатов проведенных исследований разработаны процессы формообразования конических поверхностей стоматологических наконечников диаметром 0,2 – 1,0 мм и длиной рабочей части 14 – 21 мм, применяемых для ультразвукового уплотнения пломбирочного материала при пломбировании корневых каналов зуба (рис. 8.)

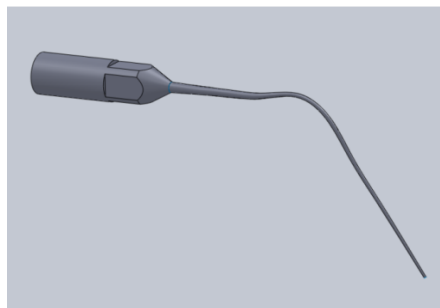


Рис. 8. Ультразвуковой стоматологический наконечник для пломбирования корневых каналов зуба

Заключение

1. Разработанный метод формообразования обеспечивает возможность формирования конических изделий малого диаметра (менее 1 мм) с заданными параметрами методом размерной ЭПО путем постепенного непрерывного выдвижения цилиндрической заготовки из электролита с переменной скоростью.

2. На основании экспериментально-теоретических исследований разработана методика расчета закономерности выдвижения цилиндрической заготовки из электролита (в виде зависимости, характеризующей изменение скорости $v_{\text{верт}}$ от координаты подъема y) с целью получения конической поверхности с заданными параметрами, учитывающая диаметр цилиндрической заготовки и технологические параметры ЭПО, которые определяют в свою очередь скорость съема.

3. На основании результатов проведенных исследований разработаны процессы формообразования конических поверхностей стоматологических наконечников диаметром 0,2 – 1,0 мм и длиной рабочей части 14 – 21 мм, применяемых для ультразвукового уплотнения пломбирочного материала при пломбировании корневых каналов зуба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров М. Е. Технология машиностроения / М. Е. Егоров. – Изд. 2-е доп. – М.: Высш. шк., 1976. – 534 с.
2. Кожевникова Г. В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г. В. Кожевникова. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 291 с.
3. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан [и др.] ; под. общ. ред. В. А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. – 719 с.
4. Бирюков, Б. Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б. Н. Бирюков. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
5. Васильевых С. Л. Особенности обработки нежестких валов / С. Л. Васильевых, В. Е. Сайтов // Современные наукоемкие технологии. – 2012. – № 11. – С. 67–68.
6. Муцянюк В. И. Бесцентровое шлифование / В. И. Муцянюк, А. Я. Братчиков ; под. общ. ред. З. И. Кремня. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. – 92 с.
7. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974– 320 с.
8. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю.Г. Алексеев А.Ю. Королев, А.Э. Паршутто, В.С. Нисс // Наука и техника. – 2012. – №3. – С. 3–6.
9. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю.Г. Алексеев, А.А. Кособуцкий, А.Ю. Королев, В.С. Нисс, Д.В. Кучерявый, А.А. Повжик // Литье и металлургия. – 2005. – №4. – С. 188–195.
10. Волновод для внутрисосудистой тромбэктомии тромбов и тромбоэMBOLов и метод его изготовления : пат. 005704 ЕАПО, МПК А61В 17/22, 17/32 ; С25F 3/16 / А.Г. Мрочек, И.Э. Адзерихо, Ю.Г. Алексеев, В.Т. Минченя, В.Н. Страх, А.Ю. Королев ; заявитель УП «Технопарк БНТУ «Метолит». – № а 20030052 ; заявл. 2003.01.24 ; опубл. 2005.02.09 // Офиц. бюл. / Евраз. пат. организ. – 2005. – № 1. – С. 145.
11. Королёв А. Ю. Технология получения сложнопрофильных длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра электролитно-плазменной обработкой : дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / А. Ю. Королёв. – Минск, 2013. – 229 с.
12. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.] ; под общ. ред. Б. М. Хрусталёва. – Минск: БНТУ, 2015. – 203 с.