

**КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ
КОНЦЕНТРАТОРОВ-ИНСТРУМЕНТОВ**

Под общей редакцией
академика НАН Беларуси Б.М. Хрусталёва

Минск
БНТУ
2015

УДК 621.9.047.7:621.778.04

А в т о р ы :

*Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, В.Т. Минченя,
В.С. Нисс, А.Э. Париццо, Б.М. Хрусталёв*

Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю.Г. Алексеев [и др.] ; под общ. ред. акад. НАН Беларуси Б.М. Хрусталёва. – Минск : БНТУ, 2015. – 203 с. – ISBN 978-985-550-702-5.

В монографии рассматриваются вопросы повышения надёжности гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов за счет совершенствования технологии их изготовления на примере ступенчатых концентраторов-инструментов, применяемых в медицине для разрушения тромбов внутри сосудов.

Предназначена для специалистов, занимающихся исследованием и разработкой новых методов обработки материалов, комбинированных методов обработки. Монография также будет полезна при обучении студентов, магистрантов и аспирантов по специальности «Технология машиностроения».

Табл. 27. Ил. 99. Библиогр. 146.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол № 3 от 13.03.2015 г.)

Р е ц е н з е н т ы :

академик, д-р техн. наук, профессор *А.И. Гордиенко*,
академик, д-р техн. наук, профессор *В.В. Клубович*

ISBN 978-985-550-702-5

© Белорусский национальный
технический университет, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ КОНЦЕНТРАТОРЫ-ИНСТРУМЕНТЫ И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЛИННОМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	9
1.1 Ультразвуковые стержневые концентраторы-инструменты, применяемые в медицинской практике.....	9
1.1.1 Требования, предъявляемые к ультразвуковым медицинским концентраторам-инструментам.....	9
1.1.2 Материалы и конструкции ультразвуковых медицинских концентраторов-инструментов.....	15
1.1.3 Методы расчета и конструирования и гибких волноводных систем для внутрисосудистой ультразвуковой ангиопластики.....	19
1.2 Методы получения сложнопрофильных длинномерных поверхностей.....	37
1.2.1 Методы формообразования длинномерных профилей прокаткой и волочением.....	39
1.2.2 Механическая обработка длинномерных профилей шлифованием.....	45
1.2.3 Размерная электрохимическая обработка изделий.....	46
1.2.4 Электрохимическое полирование и электролитно-плазменная обработка поверхностей изделий сложной формы.....	49
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ	58
2.1 Обоснование конструкции и материала концентратора- инструмента.....	58
2.2 Методы исследования структуры и свойств поверхностного слоя деформированного материала.....	62
2.3 Расчет режимов получения заготовки волочением, совмещенным с электролитно-плазменной обработкой.....	66
2.4 Метод определения остаточных напряжений в материале.....	67
2.5 Методы исследования прочностных и акустических характеристик материала.....	74
2.6 Методы и оборудование для исследования особенностей формирования парогазовой оболочки и определения съема металла при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей.....	77

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОЦЕССЕ
ВОЛОЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА ПРИ
ПОЛУЧЕНИИ ЗАГОТОВКИ ДЛИННОМЕРНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ
МЕДИЦИНСКИХ КОНЦЕНТРАТОРОВ-ИНСТРУМЕНТОВ..... 80

3.1 Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и
свойства поверхности деформированного материала..... 80

3.1.1 Микромеханические исследования поверхностного слоя..... 80

3.1.2 Микроструктурные, рентгеноструктурные и электронно-
микроскопические исследования поверхностного слоя..... 83

3.2 Влияние продолжительности электролитно-плазменной обработки
между проходами волочения на распределение остаточных напряжений
в материале.....91

3.3 Исследование процесса волочения заготовки с промежуточной
электролитно-плазменной обработкой.....95

3.4 Влияние электролитно-плазменной обработки между проходами
волочения на усталостную прочность и акустические характеристики
заготовки99

3.4.1 Влияние электролитно-плазменной обработки между
проходами волочения на усталостную прочность заготовки..... 99

3.4.2 Влияние электролитно-плазменной обработки между
проходами волочения на акустические характеристики заготовки..... 101

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗМЕРНОЙ
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЛИННОМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ..... 103

4.1 Влияние условий формирования парогазовой оболочки на характер
изменения и величину съема металла..... 103

4.2 Влияние параметров электролитно-плазменной обработки и
геометрии поверхностей диаметра на скорость съема металла..... 108

4.2.1 Влияние глубины погружения заготовки в электролит
на скорость съема..... 109

4.2.2 Влияние температуры электролита на скорость съема..... 110

4.2.3 Влияние рабочего напряжения на скорость съема..... 112

4.2.4 Влияние радиуса кривизны обрабатываемой поверхности
на скорость съема..... 113

4.3 Математическая модель для расчета скорости съема металла
при электролитно-плазменной обработке длинномерных цилиндриче-
ских поверхностей..... 115

4.4 Оптимизация параметров размерной электролитно-плазменной
обработки длинномерных цилиндрических поверхностей..... 126

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ КОНЦЕНТРАТОРОВ-ИНСТРУМЕНТОВ.....	130
5.1 Технология изготовления сложнопрофильных ультразвуковых медицинских концентраторов-инструментов.....	130
5.1.1 Получение заготовки концентратора-инструмента волочением с промежуточной электролитно-плазменной обработкой.....	130
5.1.2 Формообразование поверхностей концентратора-инструмента методом размерной электролитно-плазменной обработки.....	132
5.2 Оборудование для изготовления концентратора-инструмента.....	142
5.3 Эксплуатационные испытания концентраторов-инструментов.....	149
5.4 Применение концентраторов-инструментов в медицинской практик.....	151
 ГЛАВА 6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ.....	 154
6.1 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–1.042.....	154
6.2 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–10.....	156
6.3 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–114.....	158
6.4 Комплекс для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–11–12.....	160
6.5 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–17.....	163
6.6 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–5.....	168
6.7 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–22.....	171
6.8 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭПО–3.....	177
6.9 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭПО–40.....	179
6.10 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭПО–100.....	182
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	 187
 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	 190

ВВЕДЕНИЕ

Концентраторы-инструменты, традиционно применяемые в ультразвуковой технике и технологии, представляют собой стержневые колебательные системы с переменной площадью поперечного сечения, присоединяемые к источнику колебаний (электроакустическому преобразователю) через сечение с наибольшей площадью [1]. Также существуют концентраторы, выполненные в виде соединенных друг с другом стержней с постоянной площадью поперечного сечения, различающихся механическими свойствами материала [1, 2]. Коэффициент усиления концентраторов с переменной площадью поперечного сечения определяется отношением площадей входного и выходного сечений. Поэтому при заданном диаметре входного сечения (заданных габаритных размерах электроакустического преобразователя) получение большого коэффициента усиления возможно лишь при малом диаметре выходного сечения. Возможность уменьшения диаметра выходного сечения концентратора в свою очередь ограничена рядом факторов, в первую очередь прочностью концентратора, что лимитирует максимально достижимый коэффициент усиления. Концентраторы второго типа (выполненные из нескольких материалов) технологически сложны в изготовлении, так как требуется соединение существенно различающихся по своим свойствам и составу материалов. Выполнение таких соединений возможно с использованием современных методов сварки, в частности, диффузионной сварки [3], однако при большой амплитуде колебаний концентратора наличие любых механических соединений становится нежелательным.

Отмеченные недостатки становятся особенно заметными при разработке так называемых гибких концентраторов-инструментов, то есть концентраторов, обладающих малым диаметром и малой изгибной жесткостью и предназначенных для введения ультразвуковых колебаний в изогнутые каналы и другие труднодоступные области [4]. Одним из применений гибких концентраторов-инструментов является ультразвуковая ангиопластика – разрушение тромбов в кровеносных сосудах.

Несмотря на большие достижения в лечении сердечно-сосудистых заболеваний, данная патология продолжает оставаться

главной причиной заболеваемости и смертности в Беларуси и в мире. Для восстановления кровоснабжения обычно используется медикаментозная коррекция, которая в случае далеко зашедшего атеросклеротического процесса не дает клинически ощутимого эффекта, а также интервенционные и хирургические методы, характеризующиеся большим операционным травматизмом, значительным количеством ранних послеоперационных осложнений и высокой стоимостью лечения.

В качестве альтернативы для лечения атеросклеротических заболеваний предложен метод и оборудование для ультразвуковой ангиопластики, разработанные специалистами Белорусского национального технического университета и Государственного предприятия «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» совместно с кардиологами РНПЦ «Кардиология» и БелМАПО. В основе метода лежит разрушение атеросклеротических образований низкочастотным высокоинтенсивным ультразвуком. Оборудование для ультразвуковой ангиопластики включает ультразвуковой генератор, ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь и сменный концентратор-инструмент. Разрушение атеросклеротических образований достигается за счет механического и кавитационного внутрисосудистого воздействия с помощью гибкого концентратора-инструмента диаметром 0,5–1,8 мм и длиной до 1200 мм, связанного с концентратором и обеспечивающего передачу комбинированных ультразвуковых колебаний с частотой 22–28 кГц в зону хирургического воздействия. Проведенные исследования [5, 6, 7] показали, что ультразвуковая ангиопластика является одним из наиболее перспективных направлений в области интервенционной кардиологии. В результате исследований разработанного метода установлена высокая эффективность разрушения тромбов и атеросклеротических бляшек с использованием ультразвука.

В основе ультразвуковой ангиопластики лежит сочетание ряда свойств ультразвука: способность избирательно воздействовать на биологические ткани, в данном случае – уплотнять и частично разрушать внутрисосудистые отложения, малая травматичность и возможность управлять параметрами процесса (амплитудой колебаний, частотой, скажностью, средней мощностью и др.) в зависимости от показаний. Ультразвуковая ангиопластика позволяет разрушать

структуру внутрисосудистых отложений путем контактного воздействия рабочими наконечниками концентраторов-инструментов, имеющих форму шара или оливы. По оценкам кардиологов потребность в операциях по ультразвуковому разрушению тромбов только в Беларуси составляет около 300 в год.

Работы по исследованию метода ультразвуковой ангиопластики и созданию ультразвуковых волноводных систем в настоящее время проводятся также в Германии, США и Ирландии [8, 9, 10, 11]. Однако до настоящего времени не решена проблема создания технологии изготовления гибких длинномерных концентраторов-инструментов малого диаметра, обладающих высокими акустическими и прочностными характеристиками. Существующие процессы получения длинномерных изделий малого диаметра, основанные на пластических методах, механической обработке и физико-технических методах, имеют ряд недостатков, не позволяющих изготавливать концентраторы-инструменты с требуемыми характеристиками. Показатели надёжности существующих гибких концентраторов-инструментов являются крайне низкими поскольку процессе эксплуатации они испытывают сложное напряженное состояние, представляющее собой комбинацию статического изгиба, возникающего при введении концентратора-инструмента в изогнутые участки кровеносных сосудов, и высокочастотного динамического растяжения-сжатия, связанного с распространением в концентраторе-инструменте ультразвуковых волн.

В этой связи актуальными как в научном, так и в практическом плане являются работы, направленные на разработку и исследование технологии, обеспечивающей получение гибких концентраторов-инструментов малого диаметра, обладающих высокими прочностными и акустическими характеристиками.

ГЛАВА 1

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ КОНЦЕНТРАТОРЫ-ИНСТРУМЕНТЫ И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЛИННОМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

1.1 Ультразвуковые стержневые концентраторы-инструменты, применяемые в медицинской практике

1.1.1 Требования, предъявляемые к ультразвуковым медицинским концентраторам-инструментам

При выборе материалов для изготовления ультразвуковых концентраторов-инструментов предъявляют требования, к которым относятся, в первую очередь, наименьший коэффициент потерь, высокие прочностные показатели при динамических нагрузках, стабильность свойств при изменении температурного режима, стоимость материала, его дефицитность и обрабатываемость [12].

Существует широкий диапазон материалов, пригодных по отдельным показателям для изготовления волноводных систем (прочностные и акустические характеристики): стали, титан и его сплавы, сплавы на основе алюминия и др. [13]. Однако при изготовлении медицинских концентраторов-инструментов необходимо также учитывать характеристики среды, в которой они работают. Медицинские концентраторы-инструменты подвергаются стерилизации и дезинфекции, а при эксплуатации соприкасаются с биологическими жидкостями и тканями в организме человека. Соответственно материал медицинских концентраторов-инструментов должен обладать высокой коррозионной стойкостью и не должен оказывать вредного воздействия на организм человека.

Во время эксплуатации в материале ультразвуковых концентраторов-инструментов возникают механические колебания, приводящие к возникновению напряжений, сравнимых с пределом прочности. При этом в результате длительного воздействия повторно приложенных циклических напряжений возникает вероятность усталостного разрушения материала [14]. Результатом циклического нагружения является необратимый процесс накопления повреждений, являющихся по существу очагами будущего разрушения

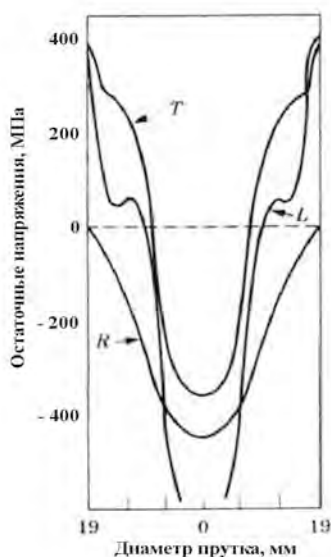
[15]. Поэтому к основным требованиям, предъявляемым к материалу концентраторов-инструментов, следует также отнести их высокие прочностные характеристики. Материал концентраторов-инструментов должен обладать высокой надежностью при значительных циклических нагружениях, т.е. должен иметь высокий предел прочности и предел выносливости.

На значение предела выносливости материала значительное влияние оказывают остаточные напряжения в поверхностном слое и дефектность его структуры [16]. Остаточные напряжения могут быть как вредными (приводят к появлению недопустимых остаточных деформаций, поводок, трещин, к полному разрушению, ускоряют коррозию), так и полезными (повышают предел упругости системы, предел выносливости, коррозионную стойкость). Вредными большей частью оказываются растягивающие остаточные напряжения, особенно при двух- и трехосном напряженном состоянии, а полезными – сжимающие остаточные напряжения [17, 18, 19].

Растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях особенно вредны для изделий, работающих при знакопеременной нагрузке, так как такие напряжения способствуют усталостному разрушению (усталостная трещина зарождается на поверхности изделия). При больших остаточных напряжениях разрушение часто происходит от незначительных по величине нагрузок (особенно ударных) [20]. Особенно проявляется влияние этих напряжений при наличии концентраторов напряжений; чувствительность к надрезам в этом случае возрастает иногда даже вдвое [21]. Вредное действие остаточных напряжений сказывается в повышении общей химической активности металла. Особенно вредно усиление межкристаллитной коррозии под действием растягивающих остаточных напряжений [22]. Уровень остаточных напряжений является одним из основных факторов, влияющих на развитие микродефектов в материале и определяющих его работоспособность [23].

В качестве заготовок для изготовления медицинских концентраторов-инструментов, как правило, используются прутки и проволока, получаемые волочением. Волочение материалов сопровождается появлением неблагоприятных остаточных напряжений в поверхностных слоях заготовки, значительно снижающих усталостную прочность материала [24]. В процессе волочения периферийные слои подвергаются большим деформациям сдвига в продольном

направлении, чем центральные. Поэтому после окончания процесса волочения периферийные слои вследствие упругого последействия укорачиваются больше, чем центральные. Целостность металла как бы выравнивает эти укорочения. Поэтому неизбежно появление остаточных напряжений, растягивающих в периферийных и сжимающих в центральных слоях сплошного круглого протянутого прутка [24]. На рисунке 1.1 показано распределение остаточных напряжений при волочении прутка из углеродистой стали AISI 1045 [25]. Поэтому при волочении заготовок для концентраторов-инструментов необходимо, по возможности, использовать операции (промежуточные или дополнительные), приводящие к снижению величины остаточных напряжений в поверхностных слоях или приводящие к созданию сжимающих остаточных напряжений вместо неблагоприятных растягивающих.



L – продольные; R – радиальные; T – окружные

Рисунок 1.1 – Распределение остаточных напряжений при волочении углеродистой стали AISI 1045

Состояние поверхностного слоя материала и его напряженность, обусловленные режимами обработки при формообразовании концентраторов-инструментов из заготовки, также оказывают суще-

ственное влияние на усталостную прочность [26]. Наличие концентраторов напряжений и других дефектов на поверхности (например, при механической обработке), остаточных напряжений растяжения (при формообразовании волочением), агрессивной среды и ряда других факторов приводит к снижению предела выносливости [27].

Дефекты, образующиеся в структуре материала, как в результате волочения заготовки, так и при дальнейшем формообразовании концентраторов-инструментов приводят к нарушению акустической однородности материала, приводящей к поглощению, отражению и рассеиванию волн. В результате происходит уменьшение амплитуды и интенсивности ультразвукового сигнала, называемое затуханием [28].

Волочение приводит к формированию на поверхности заготовок дефектов в виде микротрещин, царапин, продуктов износа инструмента. Кроме того, при волочении возникают поперечные складки, которые в последующем становятся центрами развития микротрещин. Наличие дефектов на поверхности исходной катанки приводит, как правило, к появлению их и на поверхности готовой проволоки, так как поверхностные слои на выходе из волоки после волочения находятся под действием растягивающих напряжений и упруго деформированы (растянуты) этими напряжениями [29]. Всестороннее растяжение поверхностных слоев протянутой проволоки снижает пластичность этих слоев, а концентрация растягивающих напряжений на дне складок поверхности нередко является причиной того, что складки поверхности оказываются началом развития глубоких трещин (рисунок 1.2) [29]. Развитие такой трещины в процессе эксплуатации концентратора-инструмента неизбежно приводит к его разрушению.

Поэтому технологические схемы производства пружинной проволоки из коррозионно-стойкой стали в качестве обязательной операции включают операцию удаления дефектного поверхностного слоя заготовки путем шлифовки или обточки калиброванной проволоки на специальном оборудовании. Однако шлифовка или обточка проволоки в мотках, позволяющая удалить слой поверхности проволоки, пораженный дефектами, главным образом продольными, наносит на поверхность обработанной проволоки мелкие поперечные риски – следы наждачной зачистки или следы резцовой обточки [30].

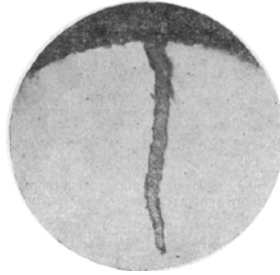


Рисунок 1.2 – Поперечное сечение проволоки с продольной трещиной, распространяющейся от поверхности вглубь сечения, 100х

Для удаления подобных дефектов при изготовлении заготовок для концентраторов-инструментов, целесообразно использовать технологические процессы, которые не вносят изменений в структуру поверхности (например, электрохимические методы обработки).

Недостатками заготовок, получаемых волочением, является также повышенная плотность дислокаций в поверхностном слое, что в значительной степени снижает усталостную прочность материала. В работе [31] установлено существование на поверхности особого слоя толщиной до 80 мкм, который является ослабленным из-за отсутствия атомов кристаллической решетки со стороны свободной поверхности. В силу этого поверхностный слой имеет более низкий предел упругого сопротивления и в результате пластической деформации упрочняется в большей мере по сравнению с нижележащими слоями. Для объяснения наблюдаемых поверхностных эффектов выдвинуто предположение о том, что в поверхностной области образуется слой с повышенной плотностью дислокаций (debris-слой), который действует как барьер, задерживая дислокации, генерированные в процессе деформации внутренними источниками [32]. Кроме того, пластическое деформирование сопровождается тепловыделением на поверхностях трения. Рост локальных температур ускоряет окислительные процессы, чему содействует рабочая среда (эмульсии и смазки). В поверхностном слое могут происходить фазовые превращения. Поэтому при волочении структура поверхностного слоя включает еще и слой адсорбированных молекул жидкостей и газов, включая ПАВ, и слой оксидов, пылевых включений, продуктов износа инструмента [33].

При изготовлении концентраторов-инструментов также необходимо обеспечивать высокое качество их поверхности. Качество поверхности оказывает существенное влияние на акустические характеристики концентраторов-инструментов. В работе [34] проводили исследования влияния шероховатости поверхности экспоненциального концентратора из стали 45 на амплитуду колебаний. Установлено, что при снижении высоты микронеровностей поверхности с Ra 1,9–2,3 мкм до Ra 0,3–0,35 мкм происходит увеличение амплитуды колебаний рабочего торца концентратора с 32–33 мкм до 42–55 мкм, т.е. в 1,3–1,7 раза. Это объясняется уменьшением потерь, связанных с отражением, преломлением и затуханием звуковой энергии на поверхности при большой высоте микронеровностей [34].

Поскольку эксплуатация концентраторов-инструментов в условиях циклических нагружений, приводит к накоплению усталостных трещин, значительно снижающих прочностные характеристики материала, то с целью исключения разрушения концентраторов-инструментов в процессе разрушения тремба их применение должно быть однократным. Согласно [35] продолжительность ультразвукового воздействия при разрушении трембов составляет 30–180 с. Поэтому с учетом коэффициента запаса надежности $n = 3$ предельная наработка концентраторов-инструментов на отказ должна составлять не менее 9 мин непрерывной работы.

Проведенный анализ показывает, что основные требования, предъявляемые к материалам для изготовления концентраторов-инструментов, сводятся к обеспечению высоких прочностных и акустических характеристик. Для выполнения этих требований при изготовлении концентраторов-инструментов необходимо использовать высокопрочные коррозионностойкие материалы с высоким пределом выносливости, высоким пределом прочности и низким коэффициентом ультразвуковых потерь (коэффициентом затухания). Кроме того, при изготовлении концентраторов-инструментов следует использовать процессы обработки, приводящие к снижению величины растягивающих остаточных напряжений или к созданию сжимающих остаточных напряжений вместо неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений. При этом необходимо применять операции, способствующие снижению в структуре мате-

риала концентраторов напряжений в виде микротрещин, питтингов, скоплений дислокаций и продуктов износа инструмента.

1.1.2 Материалы и конструкции ультразвуковых медицинских концентраторов-инструментов

Существующие стержневые концентраторы-инструменты служат для увеличения амплитуды колебательного смещения частиц (колебательной скорости частиц) в низкочастотном ультразвуковом диапазоне [36]. Такие концентраторы-инструменты представляют собой твёрдый стержень переменного сечения или переменной плотности, присоединяемый к излучателю более широким концом или частью с большей плотностью материала. Увеличение амплитуды смещения тем больше, чем больше различие диаметров или плотностей противоположных торцов стержня. Такие концентраторы-инструменты применяются в ультразвуковых технологиях и являются составной частью колебательных ультразвуковых систем, работающих в диапазоне частот от 18 до 100 кГц. Стержневой концентратор-инструмент можно рассматривать как акустический концентратор, в котором распространяется одна нулевая мода колебаний, характеризуемая постоянной амплитудой по сечению. Максимальный линейный размер широкого конца концентратора должен быть меньше $\lambda/2$ (где λ – длина волны в материале концентратора-инструмента). Концентраторы-инструменты работают обычно на резонансной частоте, поэтому их длина должна быть резонансной, т.е. кратна целому числу полуволн: $l = n\lambda/2$, где $n=1, 2, 3, \dots$. При заданной частоте длина зависит от формы концентратора-инструмента вследствие дисперсии звука в концентраторах-инструментах с переменным сечением [36]. Концентраторы-инструменты с переменной плотностью обычно изготавливают в виде двух соединённых между собой стержней из разных материалов с одинаковым поперечным сечением [36].

Принцип действия стержневых концентраторов-инструментов основан на увеличении амплитуды колебательного смещения частиц стержня в результате уменьшения его поперечного сечения [36]. При этом увеличение амплитуды смещения будет тем больше,

чем больше различие диаметров противоположных торцов стержня. Такие концентраторы-инструменты используются при работе на низких ультразвуковых частотах. Они позволяют увеличивать амплитуды колебательного смещения частиц на хвостовике и передавать волны нормального типа трех видов: продольные, изгибные и крутильные (рисунок 1.3) [36].

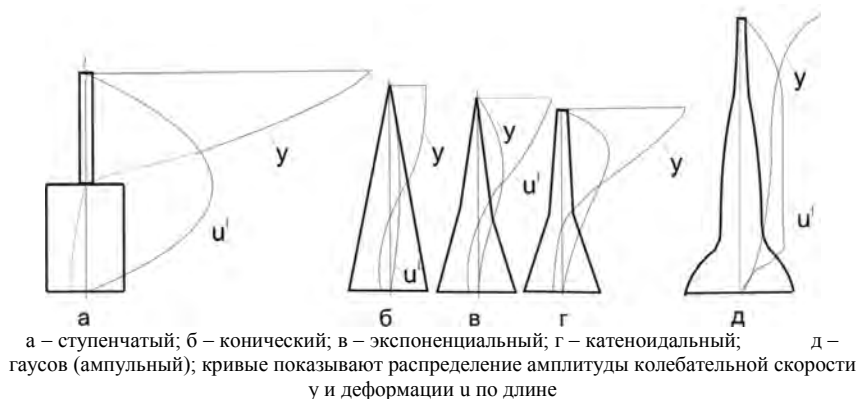


Рисунок 1.3 – Сечения круглых концентраторов-инструментов продольных колебаний

Амплитуда продольных колебаний определяет эффективность воздействия ультразвука на биологические ткани [37, 38]. Чем выше амплитуда, тем интенсивнее процесс разрушения тромбов. Поскольку амплитуда продольных колебаний на выходе из концентратора ультразвукового преобразователя, к которому присоединяется концентратор-инструмент, составляет 8–10 мкм, то с целью ее усиления необходимо использовать сложный продольный профиль гибких концентраторов-инструментов [39]. С другой стороны амплитуда продольных колебаний не должна превышать значений, при которых в материале возникают предельные напряжения, приводящие к разрушению. При ультразвуковой ангиопластике эффективное воздействие на тромбы без разрушения концентраторов-инструментов достигается при амплитуде продольных колебаний рабочего наконечника 30–60 мкм [39]. В тоже время в работах [40, 41] приведены данные об исследованиях стержневых концентраторов-инструментов длиной 250–278 мм и диаметром 1 мм из никелида титана в условиях *in vivo*, в которых также показано эффектив-

ное воздействие на тромбы без перфорации сосудистой стенки и разрушения концентраторов-инструментов даже при более высоких значениях амплитуды продольных колебаний рабочего наконечника (до 100 мкм).

Существующие конструкции концентраторов-инструментов для разрушения тромбов представляют собой цилиндрические гладкие или ступенчатые стержни. В работе [42] представлены конструкции инструментов для ультразвуковой ангиопластики из титановой проволоки диаметром 1 мм и длиной от 500 до 750 мм со сферическим наконечником диаметром 2–3 мм (рисунок 1.4).

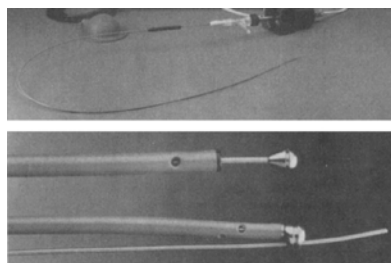


Рисунок 1.4 – Ультразвуковые инструменты со сферическим наконечником

Недостатками таких конструкций является неспособность инструмента усиливать передаваемые колебания. Такой инструмент является только проводником ультразвука. Кроме того, в представленных конструкциях рабочий сферический наконечник присоединяется к цилиндрической поверхности путем запрессовывания, что не позволяет обеспечить его надежное крепление. Под действием значительных знакопеременных нагрузок и частоте до 25 кГц существует большая вероятность отделения рабочего наконечника от тела инструмента.

В работе [43] приводятся конструкции стержневых концентраторов-инструментов для ультразвуковой ангиопластики. Концентраторы-инструменты изготавливаются из эластичного материала на основе никелида титана. Для усиления передаваемых колебаний концентраторы-инструменты имеют ступенчатую форму. Дистальная часть концентраторов-инструментов выполнена в виде конуса или цилиндра с меньшим диаметром по отношению к диаметру проксимальной части (рисунок 1.5).

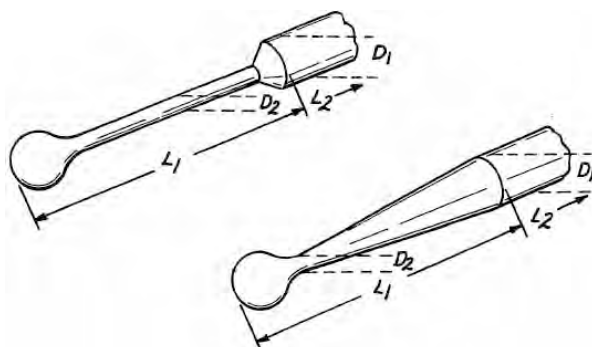


Рисунок 1.5 – Ступенчатые ультразвуковые концентраторы-инструменты

Общая длина концентраторов-инструментов составляет 500 мм. Диаметр проксимальной части D_1 составляет 0,6–0,75 мм, длина дистальной части – 50–300 мм, диаметр $D_2 = 0,3–0,5$ мм.

Основными недостатками таких концентраторов-инструментов являются малый коэффициент усиления, недостаточная гибкость, большие акустические потери на переходах между ступенями.

На рисунке 1.6 представлена конструкция трехступенчатого концентратора-инструмента с коническими переходами, изготовленного из никелида титана [44]. Общая длина концентратора-инструмента составляет 1600 мм. Диаметры ступеней концентратора-инструмента составляют 1,0; 0,35 и 0,2 мм. Диаметр второй ступени 0,35 мм обеспечивает хорошую гибкость, необходимую для прохождения извилистой геометрии сосуда, и жесткость, достаточную для продвижения концентратора-инструмента по руслу сосуда. Дистальная часть концентратора-инструмента с диаметром 0,2 мм обеспечивает максимальный доступ к стенозированным коронарным артериям.

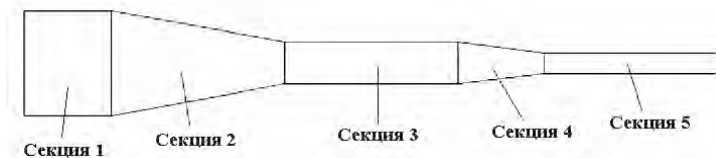


Рисунок 1.6 – Комбинированный многоступенчатый ультразвуковой концентратор-инструмент

Такая конструкция концентратора-инструмента позволяет значительно усиливать передаваемые колебания (в 2–3 раза). Основным недостатком приведенной конструкции являются большие потери, возникающие в конических переходах концентратора-инструмента.

1.1.3. Методы расчета и конструирования гибких волноводных систем для внутрисосудистой ультразвуковой ангиопластики

Нами предложена конструкция гибких концентраторов-инструментов для ультразвуковой ангиопластики с плавными переходами между ступенями, которые обеспечивают минимальные потери акустической энергии, необходимую гибкость при проведении концентраторов-инструментов в кровеносный сосуд через катетер и отсутствие концентраторов напряжений [45, 46]. Так как при выполнении сосудистых операций необходимы концентраторы-инструменты различной длины и изгибной жесткости, требуются методики расчета таких концентраторов-инструментов, что позволит обеспечить их взаимозаменяемость.

Концентратор-инструмент согласно [47] состоит из трех цилиндрических участков, имеющих различный диаметр и сопряженных между собой плавными переходами по типу концентраторов Фурье (рисунок 1.7).

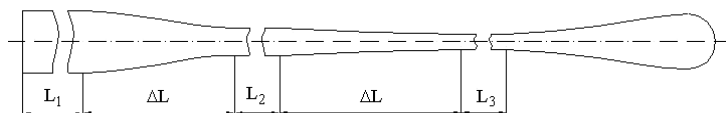


Рисунок 1.7 – Схема конструкции концентратора-инструмента для ультразвуковой ангиопластики

Колебания гибких концентраторов-инструментов имеют сложный характер и должны рассматриваться как связанные изгибно-продольные колебания. Исследование таких колебаний представляет собой весьма сложную математическую задачу, поэтому представляется разумным, прежде всего, рассмотреть продольную и из-

гибную моды без учета взаимодействия между ними, что может быть полезным для определения эффективных численных и аналитических методов решения рассматриваемой задачи. На стадии проектирования необходимо получить математическую модель процесса с применяемыми параметрами, изменяя которые можно получить требуемый результат.

Совместные продольно-изгибные колебания ультразвуковых систем ранее рассматривались в работах [48, 49], где исследовалась колебательная система, состоящая из полуволнового (по отношению к продольной моде) концентратора и связанного с ним преобразователя, содержащего пьезоэлементы, создающие продольные и изгибные колебания. Изгибные колебания концентратора с плавным изменением поперечного сечения по длине рассчитываются путем его разделения на элементарные стержни постоянного сечения с малой длиной с последующим применением метода передаточных матриц, что требует перемножения большого числа матриц и значительных затрат машинного времени.

К сожалению, приводимые в известных работах результаты расчета из классической теории колебаний стержней не могут быть обобщены на случай концентраторов-инструментов с более сложным законом изменения площади поперечного сечения и осевого момента инерции по длине. Известные математические модели учитывают в основном продольные колебания в волноводных системах. Вместе с тем, возникновение изгибных колебаний существенно снижает эффективность передачи ультразвука по гибким концентраторам-инструментам большой длины и, следовательно, должно приниматься во внимание при расчете.

1.1.3.1 Проектирование концентраторов-инструментов переменной жесткости вдоль оси

Необходимо проектировать концентратор-инструмент с геометрическими и физико-механическими свойствами такими, чтобы амплитуда продольных колебаний вдоль концентратора-инструмента нарастала. На стадии проектирования необходимо получить математическую модель процесса с переменными параметрами, изменяя которые, можно получить требуемый результат.

Для получения математической модели найдем аналитическое решение поставленной задачи методом Вентцель-Крамерса-Бриллюэна. Уровень возникающих изгибных колебаний должен быть ограничен определенным диапазоном. Расчет проводился в два этапа [50].

1. Для продольных колебаний волновода.

Пусть продольная волна в концентраторе-инструменте описывается уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(EF \frac{\partial U}{\partial x} \right) = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (1.1)$$

где $EF = L(x)$ – продольная жёсткость, зависящая от координаты X ; U – смещение; ρ – плотность; t – время.

Изгибные колебания возбуждаются продольными и описываются уравнением:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EF \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}) + \frac{\partial}{\partial x} (EF \frac{\partial U}{\partial x} \cdot \frac{\partial W}{\partial x}) = \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \quad (1.2)$$

Здесь $EF = G(x)$ – жёсткость при изгибе; W – изгибные перемещения концентратора-инструмента.

Уравнение (1.1) может рассматриваться независимо от (1.2), поэтому исследование начнём с (1.1), которое запишем в виде:

$$(EF) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial(EF)}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} - \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad (1.3)$$

Положим:

$$U(x, t) = U(x) e^{i\omega t}; \quad (1.4)$$

тогда из (1.3) получим для $U(x)$ уравнение:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} + \frac{d(\ln L)}{dx} \cdot \frac{dU}{dx} + \frac{\rho \omega^2}{L(x)} U = 0 \quad (1.5)$$

где $L(x) = EF(x)$.

Введем обозначения ,

$$P(x) = \frac{d(\ln L)}{dx}, \quad P(x) = \frac{d(\ln L)}{dx}, \quad (1.6)$$

и запишем уравнение (1.5) в виде:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} + P(x) \frac{dU}{dx} + q(x)U = 0 \quad (1.7)$$

решение (1.8) ищем в виде:

$$U = Z(x) \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^x P(\tau) d\tau \right\} = Z(x) \sqrt{\frac{L(0)}{L(x)}} \quad (1.8)$$

Подставляя (1.8) в (1.7), получи что функция $Z(x)$ - удовлетворяет уравнению:

$$Z'' + Q(x)Z = 0 \quad (1.9)$$

$$Q(x) = \frac{\rho \omega^2}{L} - \frac{1}{4} \left[\frac{d(\ln L)}{dx} \right]^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2(\ln L)}{dx^2} \quad (1.10)$$

Подставляя (1.11) в (1.10), получим для геометрических параметров волновода:

$$\frac{d \ln L}{dx} = \frac{L'}{L} = \frac{k}{L} \quad (1.12)$$

$$Q(x) = \frac{\rho \cdot \omega^2}{L} - \frac{3}{4} \cdot \frac{k^2}{L^2} = \frac{4\rho\omega^2 L^2 - 3k^2}{4L^2} \quad (1.13)$$

Точки поворота для уравнения (1.9) найдем из условия:

$$Q(x) = \frac{4\rho\omega^2 L^2 - 3k^2}{4L^2} = 0 \quad (1.14)$$

Приведем уравнение (1.14) к виду:

$$4p\omega^2(-kx + b) - 3k^2 = 0, \quad (1.15)$$

и окончательно запишем

$$\frac{4p\omega^2 - 3k^2}{4p\omega^2 k} = x_{нов} \quad (1.16)$$

Рассмотрим характер полученных аналитических решений.

Запишем уравнение (1.9) в виде:

$$Z'' - \omega^2 q_1(x)Z = 0, \quad (1.17)$$

$$\text{где } q_1 = \frac{1}{2\omega^2} \cdot \frac{d^2(\ln L)}{dx^2} + \frac{1}{4} \left[\frac{d(\ln L)}{dx} \right]^2 - \frac{\rho}{L}$$

Представим q_1 в виде

$$q_1 = -\frac{Q}{\omega^2} = \frac{3k^2/\omega^2 - 4\rho L^2}{4L^2} \quad (1.18)$$

При этом:

если $q_1 > 0$, то решения неосциллирующие и имеют вид:

$$\begin{aligned} Z_1 &= q_1^{1/4}(x) \exp[\omega \cdot S(a, x)], \\ Z_2 &= q_1^{1/4}(x) \exp[-\omega \cdot S(x, b)], \\ S(x_0, x) &= \int_{x_0}^x \sqrt{q_1(\tau)} d\tau; \end{aligned} \quad (1.19)$$

если $q_1 < 0$, то решение осциллирующее.

Запишем (1.9) в виде:

$$Z'' - \omega^2 q_2(x)Z = 0, \quad (1.20)$$

$$\text{где } q_2 = -q_1 = \frac{Q}{\omega^2} = \frac{-3k^2 / \omega^2 + 4\rho L^2}{4L^2}$$

Решения (1.20) имеют вид:

$$Z_3(x, \omega) = q_2^{-1/4} \cos[\omega \cdot S(0, x)], \quad (1.21)$$

$$Z_4 = q_2^{-1/4} \sin[\omega \cdot S(0, x)]. \quad (1.22)$$

из граничных условий имеем, при $x = 0$

$$Z_3^{(0)} = q_2^{-1/4}(0) = Z_3 \quad (1.23)$$

$$Z_4^{(0)} = 0$$

Общее решение записываем в виде:

$$U = \sqrt{\frac{L(0)}{L(x)}} \cdot Z(x) = \sqrt{\frac{L(0)}{L(x)}} (C_1 Z_3(x) + C_2 Z_4(x)) \quad (1.24)$$

Произвольные постоянные C_1, C_2 находим из граничных условий:

$$U(0) = \sqrt{\frac{L(0)}{L(0)}} (C_1 Z_3(0) + C_2 Z_4(0)) = C_1 Z_3(0)$$

$$C_1 = \frac{U(0)}{Z_3(0)} \quad (1.25)$$

$$U(l) = \sqrt{\frac{L(0)}{L(l)}} (C_1 Z_3(l) + C_2 Z_4(l))$$

$$C_2 = \frac{U(l) \sqrt{\frac{L(l)}{L(0)}} - \frac{U(0)}{Z_3(0)} \cdot Z_3(l)}{Z_4(l)} \quad (1.26)$$

$$\begin{aligned} Z_3(0) &= q_2^{-1/4}(0) \\ Z_4(0) &= 0 \\ Z_3(l) &= q_2^{-1/4}(l) \cos[\omega \cdot S(0,l)] \\ Z_4(l) &= q_2^{-1/4}(l) \sin[\omega \cdot S(0,l)] \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$S(0,l) = \int_0^l \sqrt{q_1(\tau)} d\tau, \quad (1.28)$$

где q_1 берем в виде:

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{3k^2/\omega^2 - 4\rho L^2}{4L^2} \\ q_1(0) &= \frac{3k^2/\omega^2 - 4\rho L^2(0)}{4L^2(0)} \\ q_1(l) &= \frac{3k^2/\omega^2 - 4\rho L^2(l)}{4L^2(l)} \end{aligned} \quad (1.29)$$

Проведем расчет стержневого волновода решением уравнения (1.24) с коэффициентами C_1, C_2 , определяемыми формулами (1.25), (1.26) для следующих данных:

Таблица 4.1

U_0	U'_0	l	d_0	d_g	ω	λ
5 мкм	$9 \cdot 10^2$ м/с	560 мм	2 мм	0,8 мм	26 кГц	120-140 мкм

Численный расчет для заданных значений стержня, приводимых в таблице 1 показывает, что $U(l) \approx 5U(0)$.

2. Для изгибных колебаний волновода.

Для учета влияния изгибных колебаний на параметры концентратора-инструмента в уравнении (1.2) рассмотрим второе нелинейное слагаемое, описывающее параметрическое возбуждение изгибных колебаний при распространении продольной волны. Считая это слагаемое относительно других малым, применим метод последовательных приближений:

$$W(x, t) = W_{(x,t)}^{(0)} + \varepsilon W_{(x,t)}^{(1)} + \dots \quad (1.30)$$

где ε – малый параметр порядка U' .

Подставляя (1.30) в (1.2), получим:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 W^{(0)}}{\partial x^2} \right) - \rho \frac{\partial^2 W^{(0)}}{\partial t^2} = 0; \quad (1.31)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 W^{(k)}}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial^2 W^{(k)}}{\partial t^2} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(EF \frac{\partial U}{\partial x} \cdot \frac{\partial W^{(k-1)}}{\partial x} \right); \quad k = 1, 2 \quad (1.32)$$

В уравнении (1.31) положим:

$$W_{(x,t)}^{(0)} = W_{(x)}^{(0)} e^{i\omega_1 t} \quad (1.33)$$

тогда для $W_{(x)}^{(0)}$ получим уравнение:

$$\frac{d^2}{dx^2} (G(x) \frac{d^2 W^{(0)}}{dx^2}) + \rho \omega_1^2 W^{(0)} = 0. \quad (1.34)$$

Уравнение (1.34) описывает установившиеся изгибные колебания стержня с переменной жесткостью вдоль стержня.

Таким образом доказано, что при проектировании концентраторов-инструментов, повышение амплитуды колебаний можно получить путем создания концентраторов-инструментов с переменной жесткостью: в первом случае за счет изменения волнового сопротивления вдоль стержня, во втором случае за счет переменного сечения при однородном составе. Причем, концентраторы-инструменты переменного сечения, неоднородные по длине, дают наибольшие возможности для получения требуемого эффекта.

Численными методами нами получены размеры оптимального профиля продольного сечения гибкого волновода с минимальными потерями акустической энергии.

1.1.3.2 Моделирование ультразвуковых колебаний гибкого концентратора-инструмента с усилением амплитуды за счет переменного сечения при однородном составе

Для моделирования колебаний гибких концентраторов-инструментов прежде всего математически необходимо описать профили переходов [51]. Пусть профиль задан значениями диаметра d_i в точках x_i , где i принимает значения от 1 до N . Значение d_1 соответствует диаметру D_1 ступени концентратора-инструмента с бóльшим поперечным сечением, а d_N – диаметру D_2 ступени с меньшим сечением. Не ограничивая общности, поместим начало

координат во входном сечении перехода, то есть положим $x_1 = 0$.

Аппроксимируем профиль многочленом вида $d(x) = \sum_{k=0}^m a_k x^k$. Мно-

гочлен должен проходить через заданные точки профиля, что эквивалентно выполнению условия $d(x_i) = d_i$. Кроме того, должны выполняться условия гладкого сопряжения между переходом и ступенями концентратора-инструмента $d'(0) = d'(x_N) = 0$. Таким образом, всего должно выполняться $N+2$ условия, то есть степень многочлена m определяется равенством $m = N + 1$. Из условия $d(0) = D_1$ получим $a_0 = D_1$, а из условия $d'(0) = 0$ следует равенство $a_1 = 0$. Для определения остальных коэффициентов многочлена необходимо решить систему из N линейных уравнений. В результате расчета для изображенного на рисунке 1.7 концентратора-инструмента получены значения коэффициентов, приведенные в таблице 1.2. Значения диаметра были заданы в 7 точках с шагом 1 мм.

Таблица 1.2 – Значения коэффициентов многочленов, аппроксимирующих профили переходов концентратора-инструмента согласно рисунку 1.7

	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
Переход 1	-115,1	-741,2	6,2e6	-3,5e8	2,0e10	-3,3e13	3,6e15
Переход 2	-151,2	1,4e5	-7,8e7	2,7e10	-5,5e12	5,8e14	-2,5e16

При дальнейшем построении модели будем для простоты рассматривать двухступенчатый концентратор-инструмент, так как обобщение приведенных ниже рассуждений и зависимостей на случай произвольного числа ступеней не представляет трудности.

Пусть первая ступень концентратора-инструмента имеет длину L_1 , вторая – длину L_2 , а переходный участок – длину ΔL . Определим соотношение длин, обеспечивающее изгибной резонанс концентратора-инструмента на заданной частоте f . Для этого рассмотрим вначале изгибные колебания переходного участка. Обозначим амплитуду изгибных смещений через $\eta(x)$. Распространение гармонической изгибной волны в стержне переменного сечения описывается уравнением:

$$(EJ\eta'')'' + \rho\omega^2 S(x)\eta = 0,$$

где E – модуль упругости материала стержня;

$J(x) = \pi d^4(x)/64$ – осевой момент инерции поперечного сечения стержня;

ρ – плотность материала стержня;

$\omega = 2\pi f$ – циклическая частота колебаний;

$S(x) = 0,25\pi d^2(x)$ – площадь поперечного сечения стержня.

Учитывая, что момент инерции J изменяется по длине стержня, то есть $J = J(x)$, получим:

$$\eta^{IV} + \frac{2J'}{J}\eta''' + \frac{J''}{J}\eta'' + \kappa^4(x)\eta = 0, \quad (1.35)$$

где $\kappa(x) = \sqrt[4]{\frac{\rho\omega^2 S(x)}{EJ(x)}} = 2\sqrt[4]{\frac{\rho\omega^2}{Ed^2(x)}} = 2\sqrt{\frac{2\pi f}{cd(x)}}$ – локальное значение волнового числа для изгибной моды;

c – скорость продольной ультразвуковой волны в материале стержня.

Учитывая связь осевого момента инерции поперечного сечения с его диаметром для коэффициентов уравнения (1.35) можно получить следующие выражения:

$$\frac{2J'}{J} = \frac{8d'}{d}; \quad \frac{J''}{J} = \frac{4(dd'' + 3(d')^2)}{d^2}.$$

Пусть:

$$\tilde{\eta}^{(1)}(x) = \eta^{(1)}(x)/\eta^{(1)}(0),$$

где $\eta^{(1)}(x)$ – частное решение уравнения (1.35) при начальных условиях $\eta(0) = 1$, $\eta'(0) = 0$, $\eta''(0) = 0$, $\eta'''(0) = 0$;

$$\tilde{\eta}^{(2)}(x) = \eta^{(2)}(x)/\eta^{(2)'}(0),$$

где $\eta^{(2)}(x)$ – частное решение уравнения (1.35) при начальных условиях $\eta(0) = 0$, $\eta'(0) = 1$, $\eta''(0) = 0$, $\eta'''(0) = 0$;

$$\tilde{\eta}^{(3)}(x) = \eta^{(3)}(x) / \eta^{(3)''}(0),$$

где $\eta^{(3)}(x)$ – частное решение уравнения (1.35) при начальных условиях $\eta(0) = 0$, $\eta'(0) = 0$, $\eta''(0) = 1$, $\eta'''(0) = 0$,

$$\tilde{\eta}^{(4)}(x) = \eta^{(4)}(x) / \eta^{(4)''''}(0),$$

где $\eta^{(4)}(x)$ – частное решение уравнения (1.35) при начальных условиях $\eta(0) = 0$, $\eta'(0) = 0$, $\eta''(0) = 0$, $\eta'''(0) = 1$.

Можно показать, что функции $\tilde{\eta}^{(i)}(x)$ ($i = 1 \dots 4$) линейно независимы. Это значит, что частное решение уравнения (1.35) при произвольных начальных условиях $\eta(0)$, $\eta'(0)$, $\eta''(0)$, $\eta'''(0)$, которые заранее неизвестны и определяются формой переходного участка, а также параметрами ступеней концентратора-инструмента, может быть представлено в виде:

$$\eta(x) = \eta(0)\tilde{\eta}^{(1)}(x) + \eta'(0)\tilde{\eta}^{(2)}(x) + \eta''(0)\tilde{\eta}^{(3)}(x) + \eta'''(0)\tilde{\eta}^{(4)}(x) \quad (1.36)$$

Обозначим далее через $\eta_1(x_1)$ и $\eta_2(x_2)$ амплитуды изгибных смещений для первой и второй ступеней концентратора-инструмента. Координаты x_1 и x_2 будем отсчитывать от входных сечений соответствующих ступеней.

Для первой ступени концентратора-инструмента должны выполняться условия:

$$\eta_1(0) = 0, \quad \eta_1'(0) = 0, \quad (1.37)$$

выражающие отсутствие поперечных смещений входного сечения ступени и равенство нулю угла поворота этого сечения.

Для второй ступени должны выполняться условия

$$\eta_2''(L_2) = 0, \quad \eta_2'''(L_2) = 0, \quad (1.38)$$

выражающие отсутствие поперечных сил и изгибающих моментов на свободном конце ступени.

Условия сопряжения ступеней концентратора-инструмента с переходным участком имеют вид:

$$\begin{aligned}\eta(0) &= \eta_1(L_1), \quad \eta'(0) = \eta'_1(L_1), \\ \eta''(0) &= \eta''_1(L_1), \quad \eta'''(0) = \eta'''_1(L_1),\end{aligned}\quad (1.39)$$

$$\begin{aligned}\eta_2(0) &= \eta(\Delta L), \quad \eta'_2(0) = \eta'(\Delta L) \\ \eta''_2(0) &= \eta''(\Delta L), \quad \eta'''_2(0) = \eta'''(\Delta L).\end{aligned}\quad (1.40)$$

С учетом разложения (1.36) и условий (1.39) граничные условия (1.40) можно представить в виде:

$$\left. \frac{d^i \eta_2}{dx_2^i} \right|_{x_2=0} = \sum_{j=1}^4 a_{j(i+1)} \left. \frac{d^{j-1} \eta_1}{dx_1^{j-1}} \right|_{x_1=L_1}, \quad i=1\dots 4 \quad (1.41)$$

Здесь введено обозначение:

$$a_{ij} = \left. \frac{d^{j-1} \tilde{\eta}^{(i)}}{dx^{j-1}} \right|_{x=\Delta L}, \quad i=1\dots 4, \quad j=1\dots 4.$$

Амплитуда изгибных колебаний для ступеней концентратора-инструмента будет описываться уравнениями:

$$\eta_1(x_1) = C_1 \sin(\kappa_1 x_1) + C_2 \cos(\kappa_1 x_1) + C_3 sh(\kappa_1 x_1) + C_4 ch(\kappa_1 x_1), \quad (1.42)$$

$$\eta_2(x_2) = C_5 \sin(\kappa_2 x_2) + C_6 \cos(\kappa_2 x_2) + C_7 sh(\kappa_2 x_2) + C_8 ch(\kappa_2 x_2), \quad (1.43)$$

где $\kappa_2 = 2\sqrt{\frac{2\pi f}{cD_2}}$ – значения волнового числа для первой и второй ступеней.

Постоянные C_i ($i=1\dots 8$) могут быть определены из граничных условий (1.37), (1.38) и (1.41). Подстановка уравнений (1.42) и (1.43) в указанные граничные условия дает для определения неиз-

вестных постоянных систему из восьми однородных линейных алгебраических уравнений. Из условий (1.37) следует $C_1 = -C_3$, $C_2 = -C_4$. В результате число уравнений сокращается до шести и получаем систему вида $AC = 0$, где A – матрица коэффициентов, C – вектор неизвестных постоянных. Эта система имеет нетривиальное (отличное от нуля) решение только в случае, когда ее определитель обращается в нуль. Это возможно лишь при определенном соотношении длин ступеней L_1 и L_2 (условие резонанса). Математически условие резонанса может быть представлено в виде

$$G(L_1, L_2) = \det(A(L_1, L_2)) = 0. \quad (1.44)$$

Кривые, определяемые уравнением (1.44), будем называть резонансными кривыми.

Уравнение, описывающее распространение продольной гармонической волны в переходном участке концентратора-инструмента, имеет вид:

$$\xi'' + (\ln S)' \xi' + k^2 \xi = 0, \quad (1.45)$$

где $\xi(x)$ – амплитуда продольных смещений;

$k = \omega/c$ – значение волнового числа для продольной моды.

Пусть $\tilde{\xi}^{(1)}(x) = \xi^{(1)}(x)/\xi^{(1)}(0)$, где $\xi^{(1)}(x)$ – частное решение уравнения (1.30) при начальных условиях $\xi(0) = 1$, $\xi'(0) = 0$, $\tilde{\xi}^{(2)}(x) = \xi^{(2)}(x)/\xi^{(2)'}(0)$, где $\xi^{(2)}(x)$ – частное решение уравнения (1.45) при начальных условиях $\xi(0) = 0$, $\xi'(0) = 1$.

Функции $\tilde{\xi}^{(i)}(x)$ ($i=1,2$) линейно независимы, поэтому частное решение уравнения (1.45) при произвольных начальных условиях может быть представлено в виде:

$$\xi(x) = \xi(0)\tilde{\xi}^{(1)}(x) + \xi'(0)\tilde{\xi}^{(2)}(x). \quad (1.46)$$

Если обозначить через $\xi_1(x_1)$ и $\xi_2(x_2)$ амплитуды продольных смещений для первой и второй ступеней концентратора-инструмента, то граничные условия примут вид:

$$\xi_1'(0) = 0, \quad \xi_2'(L_2) = 0. \quad (1.47)$$

Условия (1.47) выражают отсутствие механических напряжений на свободных концах концентратора-инструмента.

Условия сопряжения ступеней концентратора-инструмента с переходным участком имеют вид:

$$\xi(0) = \xi_1(L_1), \quad \xi'(0) = \xi_1'(L_1), \quad (1.48)$$

$$\xi_2(0) = \xi(\Delta L), \quad \xi_2'(0) = \xi'(\Delta L) \quad (1.49)$$

С учетом разложения (1.46) и условий (1.48) граничные условия (1.49) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \xi_2(0) &= b_{11} \xi_1(L_1) + b_{21} \xi_1'(L_1), \\ \xi_2'(0) &= b_{12} \xi_1(L_1) + b_{22} \xi_1'(L_1). \end{aligned} \quad (1.50)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} b_{11} &= \tilde{\xi}^{(1)}(\Delta L), \quad b_{21} = \tilde{\xi}^{(2)}(\Delta L), \\ b_{12} &= \tilde{\xi}^{(1)' }(\Delta L), \quad b_{22} = \tilde{\xi}^{(2)' }(\Delta L). \end{aligned}$$

Амплитуда продольных колебаний для ступеней концентратора-инструмента будет описываться уравнениями:

$$\xi_1(x_1) = c_1 \sin(kx_1) + c_2 \cos(kx_1), \quad (1.51)$$

$$\xi_2(x_2) = c_3 \sin(kx_2) + c_4 \cos(kx_2). \quad (1.52)$$

Постоянные c_i ($i = 1..4$) могут быть определены из граничных условий (1.47) и (1.50). Подстановка уравнений (1.52) и (1.53) в указанные граничные условия дает для определения неизвестных постоянных систему из четырех однородных линейных алгебраических уравнений. Из условий (1.47) следует $c_1 = 0$. В результате число уравнений сокращается до трех и получаем систему вида $Bc = 0$, где B – матрица коэффициентов, c – вектор неизвестных постоянных. Эта система имеет нетривиальное решение только в случае, когда ее определитель обращается в нуль, что приводит к условию резонанса продольных колебаний

$$H(L_1, L_2) = \det(B(L_1, L_2)) = 0. \quad (1.53)$$

Численный анализ предложенной модели производился для двухступенчатого концентратора-инструмента с переходным участком типа 1 (таблица 1.2).

Для определения базисных функций разложений (1.36) и (1.46) производилось численное решение соответствующих задач Коши для уравнений (1.35) и (1.45). Решение производилось методом Рунге-Кутты с помощью программы *MathCad*. По результатам расчета определялись значения коэффициентов a_{ij} ($i = 1..4, j = 1..4$) и b_{pq} ($p = 1,2, q = 1,2$) в граничных условиях (1.41) и (1.50). Далее на основе граничных условий составлялись частотные уравнения (1.44) и (1.54) и строились резонансные кривые для продольных и изгибных колебаний. Резонансные кривые для частоты 25 кГц приведены на рисунке 1.8.

Приведенные резонансные кривые были построены как контурные графики функций $g(L_1, L_2) = \text{sgn}(G(L_1, L_2))$ и $h(L_1, L_2) = \text{sgn}(H(L_1, L_2))$.

Точки пересечения резонансных кривых продольных и изгибных колебаний (резонансные точки) соответствуют отношению $L_1 : L_2$, обеспечивающим совместный резонанс этих колебаний. На практике представляет интерес случай, когда при заданном порядке продольной моды колебаний длина концентратора-инструмента максимальна, так как в этом случае концентратор-инструмент мо-

жет передавать акустическую энергию на значительное расстояние.

Так как длина концентратора-инструмента возрастает с увеличением порядка изгибной моды колебаний, то для проектирования оптимальных по длине концентратора-инструмента можно рассматривать только те резонансные точки, которые соответствуют наивысшему порядку изгибной моды $n_{f \max}$, для которого резонансная кривая изгибных колебаний пересекается с резонансной кривой продольной моды данного порядка.

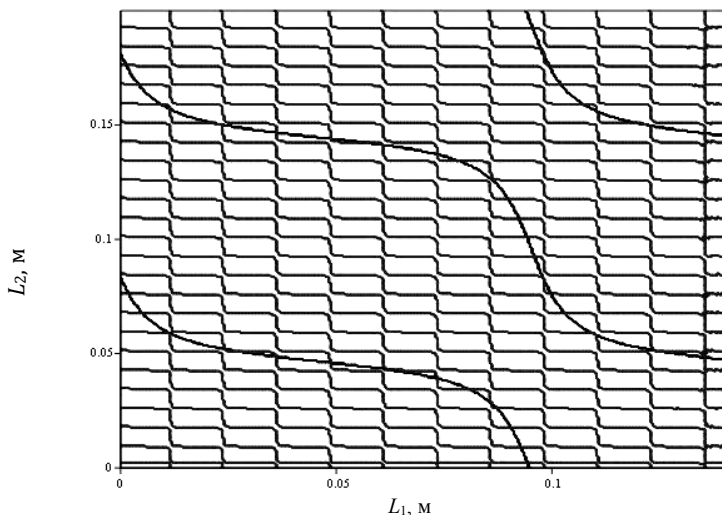


Рисунок 1.8 – Резонансные кривые двухступенчатого концентратора-инструмента для частоты 25 кГц

Под порядком моды мы понимаем номер резонансной кривой, которая соответствует данной моде. Для продольной моды первого порядка $n_{f \max} = 11$, для продольной моды второго порядка $n_{f \max} = 23$. Возможные соотношения длин ступеней для этих мод и общая длина L концентраторов-инструментов с учетом длины переходного участка $\Delta L = 6 \text{ мм}$ приведены в таблице 1.3. Максимальные значения длин концентраторов-инструментов подчеркнуты и выделены курсивом.

Таблица 1.3 – Результаты расчета линейных размеров двухступенчатого концентратора-инструмента для первой и второй мод продольных колебаний

Порядок моды продольных колебаний	Порядок моды изгибных колебаний	L_1 , м	L_2 , м	L , м
1	11	0,0868	0,0270	0,1198
1	11	0,0851	0,0298	0,1209
1	11	0,0805	0,0347	<u>0,1212</u>
1	11	0,0731	0,0393	0,1184
1	11	0,0619	0,0430	0,1109
1	11	0,0609	0,0433	0,1102
2	23	0,0779	0,1347	<u>0,2186</u>
2	23	0,0700	0,1386	0,2146

На практике изгибные и продольные колебания длинного гибкого концентратора-инструмента не могут рассматриваться независимо. Если изначально имеются только продольные колебания, как это имеет место в случае присоединения гибкого концентратора-инструмента к жесткому концентратору, они переходят в изгибные колебания, так как гибкий концентратор-инструмент имеет большое отношение длины к диаметру и теряет динамическую устойчивость. Это означает, что часть энергии продольных колебаний передается изгибной моде и постоянной энергии, получаемые при независимом рассмотрении уравнений изгибной и продольной мод, не могут адекватно описывать колебания концентратора-инструмента. Изгибные колебания на дистальном конце концентратора-инструмента должны быть минимизированы, что может быть достигнуто путем выполнения грушевидного рабочего окончания на дистальном конце. В этом случае изгибные колебания, возникающие вследствие потери динамической устойчивости, преобразуются в продольные, и это означает, что изгибная и продольная моды обмениваются энергией. Так как потеря динамической устойчивости является типично нелинейным явлением, связь изгибных и продольных колебаний должна описываться нелинейными уравнениями. Нелинейные уравнения связанных продольно-изгибных колебаний хорошо разработаны для струн. Однако, они основаны на допущении, что единственным видом внутренних сил, возникающих в струне, яв-

ляются растягивающие напряжения (безмоментная теория). Изгибные колебания влияют на продольные путем создания в струне дополнительных растягивающих напряжений, обусловленных деформацией оси струны. Учет этой деформации приводит к геометрической нелинейности. Одной из проблем при разработке гибких волноводных систем для ультразвуковой ангиопластики является изменение резонансной частоты колебательной системы при прохождении концентратором-инструментом искривленных участков кровеносных сосудов и его соприкосновении с различными биологическими материалами. При неизменной частоте электрического сигнала на выходе ультразвукового генератора смещение резонансной частоты вызывает снижение амплитуды колебаний рабочего окончания концентратора-инструмента, что приводит к необходимости увеличения статического усилия, прикладываемого к концентратору-инструменту при проведении операции.

Поддержание постоянства амплитуды колебаний для разработанной конструкции концентратора-инструмента может производиться путем адаптивной подстройки частоты сигнала на выходе ультразвукового генератора с помощью системы автоматического регулирования или с помощью плавающей частоты резонанса.

1.2 Методы получения сложнопрофильных длинномерных поверхностей

Анализ размеров, конструкций и материалов для изготовления концентраторов-инструментов показывает, что возможными способами их формообразования являются: механическая обработка, пластическая деформация и физико-технические методы обработки.

Коррозионно-стойкие стали и титановые сплавы, широко применяемые при производстве изделий медицинского назначения, плохо поддаются механической обработке (резание, шлифование) [52]. Эти материалы плохо проводят тепло, что приводит к более высоким температурам в зоне резания, чем при обработке, например, углеродистых сталей такой же твердости. Коррозионно-стойкие стали и титановые сплавы склонны к налипанию на поверхность режущего инструмента. Имеются трудности со стружкодроблением и образованием заусенцев при обработке ввиду высокой прочности

данных материалов. Высокая прочность приводит к большим нагрузкам на режущую кромку инструмента. В зоне резания твердость может увеличиваться на 100 %, особенно при неправильном выборе инструмента [52].

Аустенитные коррозионно-стойкие стали достаточно хорошо поддаются обработке давлением [53]. Содержащийся в них никель обеспечивает хорошую пластичность и вязкость. В процессе холодной пластической деформации происходит упрочнение коррозионно-стойких аустенитных сталей, что вызывает эффект наклепа. Повышения пластичности этих сталей добиваются закалкой в воде при температуре 1050–1100 °С без дальнейшего отпуска. В процессе нагрева происходит растворение карбидов хрома в аустените. При охлаждении с большой скоростью выделение их из аустенита при закалке исключено. При этом получают предел прочности 500–600 МПа, и высокие характеристики пластичности. В таком состоянии аустенитные стали имеют также повышенную коррозионную стойкость [54].

Для физико-технической размерной обработки коррозионно-стойких сталей и титановых сплавов применяют электроэрозионную обработку, электрохимическую обработку, анодно-механическую обработку, электроконтактную обработку и др. Каждый из этих методов обладает уникальными технологическими возможностями, но все они более энергоемки и менее производительны по сравнению с методами механообработки [55]. Однако, в случае изготовления концентраторов-инструментов малого диаметра применение способов физико-технической обработки может быть оправдано, поскольку эффективность применения этих методов проявляется тем больше, чем сложнее форма обрабатываемой поверхности детали, выше физико-механические свойства материала и чем большие трудности возникают при ее изготовлении методами механической обработки и обработки давлением.

1.2.1 Методы формообразования длинномерных профилей прокаткой и волочением

Волочением получают проволоку и прутки диаметром от 0,002 мм до 8 мм в больших количествах для нужд электротехнической, метизной, машиностроительной промышленности и др. Процесс волочения имеет ряд преимуществ перед другими методами обработки [56]:

- высокая производительность процесса (практические скорости волочения достигают 3000 м/мин и более);
- возможность получения готового изделия круглого или фасонного сечения в широком ассортименте с чрезвычайно высокой степенью точности обработки (2 мкм) и качества поверхности;
- возможность получения готового изделия с целым комплексом заранее заданных физико-механических свойств;
- незначительные по сравнению со многими другими методами обработки отходы металла.

Схема технологического процесса волочения стали 12Х18Н9 включает следующие операции [57]:

1) подготовку поверхности к волочению (щелочно-кислотное травление катанки в расплаве каустической соды и натриевой селитры при 400–550°С, промывку водой, травление в кислоте, вторичную промывку водой, нанесение известково-соляного раствора и сушку); эти предварительные операции обеспечивают нормальное выполнение пластической деформации в волочильном отверстии, способствуют получению высокого качества поверхности изделия, уменьшают усилие и энергию на волочение и снижают износ волочильного инструмента;

2) волочение катанки с единичными обжатиями 20–30 %;

3) термическую обработку.

Указанные операции повторяются в зависимости от диаметра проволоки, а на готовом размере проволоку подвергают термической обработке в атмосфере защитного газа. По этой технологии изготавливают проволоку диаметром от 0,2 до 6,0 мм со светлой поверхностью (нагартованная), темную (нагартованную), оксидированную (термически обработанную) и травленную (термически обработанную).

Из стали 12Х18Н9 изготавливают пружинную, канатную и другие виды проволоки с $\sigma_b = 1400\text{--}1700$ МПа. Оптимальная суммарная деформация при волочении составляет 80–95 %, волочение с деформациями выше 95 % одновременно с интенсивным упрочнением приводит к падению пластических характеристик (чисел перегибов и скручивания, относительного сужения поперечного сечения и др.) проволоки. Наиболее часто применяемые единичные деформации составляют 20–25 %. В процессе волочения проволока из стали 12Х18Н9 с исходной структурой аустенита приобретает мартенситную структуру деформации [57].

Волочение чаще всего выполняют при комнатной температуре, когда пластическую деформацию сопровождает наклеп с повышением механических характеристик материала. Так, при обжатии волочением происходит значительное изменение механических характеристик: возрастают предел текучести и предел прочности, уменьшается величина относительного удлинения и относительного сужения, возрастает усталостная прочность. Проволока, упрочненная холодной деформацией, после волочения с обычными степенями частных деформаций испытывает действие остаточных напряжений, неравномерно и в большей или меньшей степени несимметрично распределенных по сечению проволоки [58].

В работе [59] проведены экспериментальные исследования по формообразованию ступенчатого ультразвукового концентратора-инструмента с диаметрами ступеней 2,0; 1,0 и 0,5 мм многократным волочением путем поэтапного протягивания заготовки через фильеры. Заготовкой для изготовления концентратора-инструмента выбрана разупрочненная проволока из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9.

Расчет режимов волочения для получения из исходной проволоки диаметром 2 мм ступеней концентратора-инструмента диаметрами 1,0 и 0,5 мм выполнялся согласно рекомендациям [60]. Ввиду больших степеней обжатия материала, формообразование проводилось в два передела с промежуточной разупрочняющей термообработкой заготовки.

Единичное обжатие за переход, определяемое формулой (1.39), не должно превышать: для диаметра 2 мм – 20 %, для диаметра 1 мм – 17 %.

$$\delta_{ед} = \frac{d_{исх}^2 - d_{кон}^2}{d_{исх}^2} \cdot 100\% \quad (1.39)$$

где $d_{исх}$ – исходный диаметр для данного перехода;
 $d_{кон}$ – конечный диаметр.

Кроме того, коэффициент вытяжки, определяемый формулой (1.40), не должен превышать значения 1,20.

$$K = \frac{d_{исх}^2}{d_{кон}^2} \quad (1.40).$$

Расчет маршрута волочения для получения из исходного прутка 2,0 мм ступеней концентратора-инструмента диаметром 1,0 и 0,5 мм приведен в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Расчет маршрута волочения концентратора-инструмента

№ пере- хода	Исх. диа- метр $d_{исх}$, мм	Кон. диа- метр, $d_{кон}$, мм	Ед. обжа- тие, $\delta_{ед}$, %	Сум. обжа- тие, $\delta_{сум}$, %	Коэф. вытяжки, K
Передел 1					
1	2	1,84	15	15	1,18
2	1,84	1,69	16	29	1,19
3	1,69	1,55	16	40	1,19
4	1,55	1,43	15	49	1,17
5	1,43	1,32	15	56	1,17
6	1,32	1,21	16	63	1,19
7	1,21	1,10	17	70	1,20
8	1,10	1,00	17	75	1,20
Передел 2					
1	1	0,93	14	14	1,16
2	0,93	0,86	14	26	1,17
3	0,86	0,80	13	36	1,16
4	0,80	0,74	14	45	1,17
5	0,74	0,69	13	52	1,15
6	0,69	0,64	14	59	1,16
7	0,64	0,60	12	64	1,14
8	0,60	0,56	13	69	1,15
9	0,56	0,52	14	73	1,16
10	0,52	0,50	8	75	1,08

Для снятия наклепа между переделами производится разупрочняющая термообработка – нагрев до 1100 °С с охлаждением в воду.

Основным недостатком этого метода формообразования является сложность технологического процесса. Для практической реализации метода требуется изготовление большого количества волок (18 шт.). Кроме того, при волочении требуется большое количество вспомогательных операций.

Недостатком концентраторов-инструментов, получаемых методом волочения, является неоднородность механических свойств по длине, которая является причиной затухания ультразвуковых волн при эксплуатации. Так, первые две ступени концентратора-инструмента находятся в разупрочненном состоянии с пределом прочности 560–580 МПа, а дистальная ступень после суммарного обжатия 75 % имеет предел прочности 1300–1400 МПа. При этом изготовленные методом волочения концентраторы-инструменты имеют низкую усталостную прочность из-за неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в периферийных слоях и большого количества дефектов, являющихся причиной снижения прочностных и акустических характеристик концентраторов-инструментов. Недостатком метода также является необходимость запрессовки или напайки сферического рабочего наконечника.

Круглый профиль малого диаметра может быть также получен продольной прокаткой заготовки в калибрах [61, 62]. Для производства круглого профиля при продольной прокатке применяют валки с системой калибров овал-круг [55, 64]. Однако такой метод прокатки обеспечивает получение круглого профиля диаметром от 5,5 мм. Кроме того, возможности применения прокатки в калибрах при изготовлении ступенчатых концентраторов-инструментов ограничены из-за неточности заполнения профиля металлом.

Разработаны способ и оборудование для продольной прокатки конических концентраторов-инструментов длиной 600–800 мм с диаметрами большего и меньшего оснований 1,5–1,8 мм и 0,4–0,7 мм соответственно (рисунок 1.9) [65].

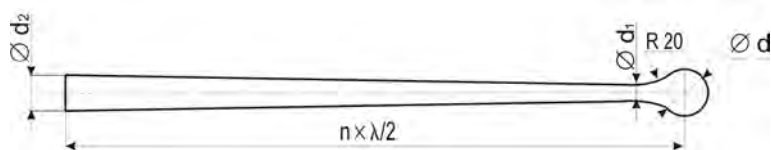


Рисунок 1.9 – Конический концентратор-инструмент

Сущность разработанного способа (рисунок 1.10) заключается в том, что заготовка круглого сечения 1 прокатывается вместе с шаблоном 2, представляющим собой две жестко скрепленные между собой полосы с переменной высотой. Шаблон задает вертикальное перемещение валков 3, создавая при этом необходимый зазор между валками в соответствии с параметрами получаемого конического профиля. В валках изготавливаются калибры эллиптической формы и пазы для установки шаблона. Механизм 4 обеспечивает прижим валков с усилием, необходимым для осуществления прокатки.

В случае прокатки с большими степенями обжатия процесс может быть осуществлен за несколько переходов с промежуточной разупрочняющей термообработкой.

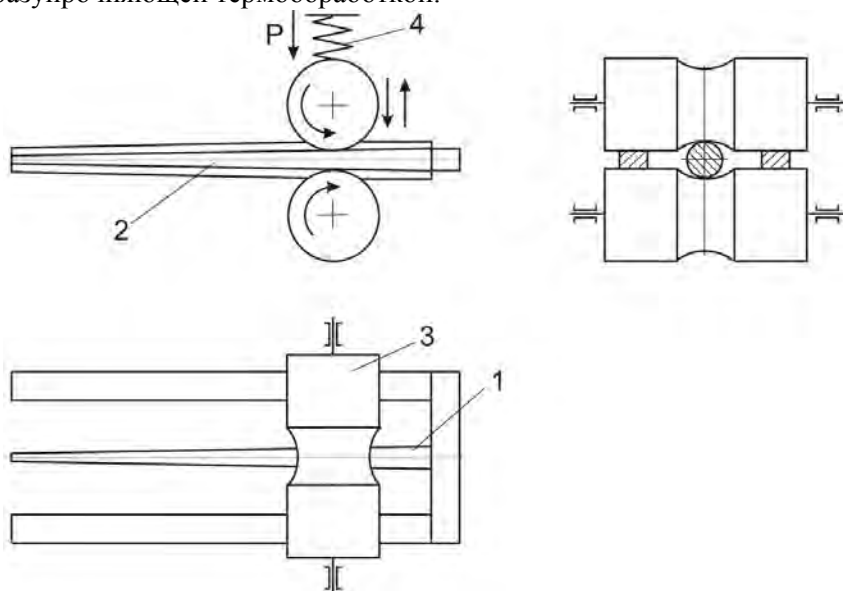


Рисунок 1.10 – Схема прокатки круглого конического профиля

Число переходов, шаблонов и калибров на валках при изготовлении конкретного профиля определяется суммарной степенью обжатия заготовки при прокатке. На рисунке 1.11 представлена схема формообразования конического профиля по переходам.



Рисунок 1.11 – Схема формообразования по переходам

Для устранения эллипсности или огранки заготовку периодически поворачивают на некоторый угол относительно продольной оси после каждого перехода. При достижении угла поворота 360° производится замена шаблона или переход на другой калибр, и прокатка повторяется по той же схеме. Для снижения усилия прокатки и устранения эффекта эллипсности и огранки может быть реализована схема реверсивной прокатки.

Преимуществами разработанного метода являются неограниченность длины получаемого профиля, возможность получения конического профиля в широком диапазоне диаметров, безотходность, высокая производительность. Особенно эффективно использование данного метода при прокатке профилей малого диаметра (1–3 мм), так как снижаются ограничения по условиям захвата, определяемые выражением (1.41):

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}, \quad (1.41)$$

где α – угол захвата;

Δh – абсолютное обжатие;

R – радиус валков.

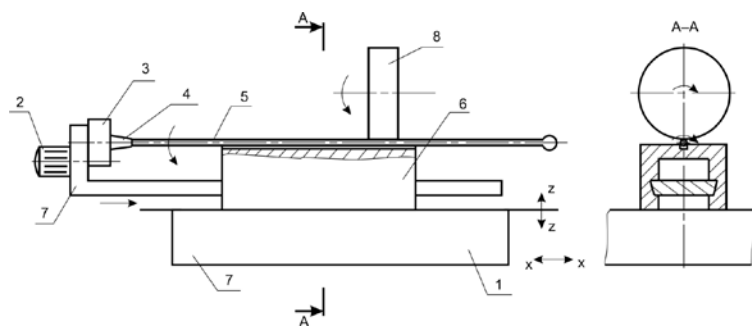
Как и при изготовлении волочением, основными недостатками конических концентраторов-инструментов, получаемых прокаткой, являются неравномерность механических характеристик по длине и необходимость напайки или запрессовки рабочего сферического наконечника. Кроме того, разработанный метод получения конического профиля является достаточно трудоемким и требует большого количества основных и вспомогательных операций.

1.2.2 Механическая обработка длинномерных профилей шлифованием

Для получения круглого длинномерного профиля малого диаметра может быть использовано бесцентровое шлифование. Бесцентровое шлифование применяется обычно для обработки прутков и проволоки диаметром от 1 мм до 25 мм [66].

В процессе бесцентрового шлифования деталь не закрепляется в центрах, в патроне или же каким-либо другим способом, а базируется по шлифующейся поверхности [67, 68]. Кроме обработки цилиндрических поверхностей метод бесцентрового шлифования позволяет обрабатывать и получать поверхности ступенчатой формы. На основании схемы бесцентрового шлифования был разработан и опробован метод формообразования поверхностей цилиндрического ступенчатого концентратора-инструмента путем шлифования на плоскошлифовальном станке [59, 69].

Для выполнения обработки сконструирована и изготовлена специальная технологическая оснастка. Общий вид схемы шлифования и оснастки показан на рисунке 1.12.



1 – стол станка; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – патрон; 5 – заготовка;
6 – накладка; 7 – направляющая; 8 – шлифовальный круг

Рисунок 1.12 – Схема шлифования концентратора-инструмента на плоскошлифовальном станке

Метод изготовления концентратора-инструмента, основанный на шлифовании, характеризуется простотой технологической оснастки и высокой скоростью обработки. Разработанная схема шлифования

позволяет сформировать рабочий наконечник непосредственно на заготовке.

Методом шлифования с использованием разработанной оснастки изготовлены опытные образцы ультразвуковых ступенчатых концентраторов-инструментов [59]. Однако проведенные эксплуатационные испытания показали низкую надежность полученных концентраторов-инструментов. Часть образцов концентраторов-инструментов разрушилась после работы продолжительностью менее 3 мин. Разрушение происходило как в узловых точках концентраторов-инструментов (в переходах), так и на цилиндрических участках. На некоторых образцах наблюдался отрыв рабочего наконечника. Проведенный анализ структуры разрушенных концентраторов-инструментов показал, что основными причинами разрушения являются концентраторы напряжений в виде глубоких микронеровностей поверхности. Шероховатость поверхности полученных концентраторов-инструментов, характеризовалась неравномерной высотой микронеровностей с присутствием отдельных глубоких впадин и высоких выступов, значительно снижающих усталостную прочность концентраторов-инструментов.

Другим недостатком изготовленных шлифованием концентраторов-инструментов являлось ухудшение их акустических характеристик. Процесс формообразования ступеней концентраторов-инструментов сопровождался изменением структуры материала, и соответственно, изменением скорости звука на отдельных участках поверхности вследствие локальных прижогов при шлифовании. Неравномерность скорости звука по всей длине концентраторов-инструментов являлась причиной смещения расчетных узловых точек и рассеивания ультразвуковых волн при работе концентраторов-инструментов.

1.2.3 Размерная электрохимическая обработка изделий

В машиностроении часто возникают технологические проблемы, связанные с обработкой материалов и деталей, форму и состояние поверхностного слоя которых трудно получить механическими методами. К таким проблемам относится обработка тонкостенных не-

жестких деталей, пазов и отверстий, имеющих размеры в несколько микрометров, поверхностей деталей с малой шероховатостью или малой толщиной дефектного поверхностного слоя. Подобные проблемы решаются применением электрофизических и электрохимических методов обработки [70].

К деталям малой жесткости относятся и ультразвуковые концентраторы-инструменты малого диаметра. Поэтому одним из возможных способов формообразования длинномерных изделий малого диаметра является размерная электрохимическая обработка, основанная на электрохимическом растворении металла заготовки при высоких плотностях электрического тока [71]. Механизм съема основан на электролизе. Заготовка является анодом, а инструмент катодом. Для стабилизации электродных процессов при размерной электрохимической обработке и своевременного удаления из межэлектродного промежутка продуктов растворения (шлама) применяют принудительную подачу в рабочую зону электролита, т.е. прокачивают его под определенным давлением [72].

Для формообразования поверхностей вращения сложной формы (таких как поверхности концентраторов-инструментов) целесообразно использовать схему размерной электрохимической обработки, приведенную на рисунке 1.13.

Электрод-инструмент 2, выполненный из электропроводного материала, поступательно перемещается со скоростью V_u , заготовка 1 вращается со скоростью $V_{окр}$. Электролит через полость электрода-инструмента подается в межэлектродный промежуток. Съем металла заготовки происходит за счет электрохимического растворения. При этом электрод-инструмент не изнашивается [71].

При размерной электрохимической обработке в качестве электролитов применяют водные растворы солей, кислот и щелочей [71]. Наиболее распространенными электролитами являются растворы неорганических солей: хлориды, нитраты, и сульфаты натрия и калия. В эти растворы добавляют борную, лимонную или соляную кислоту в целях уменьшения защелачивания электролита, ингибиторы коррозии, активирующие вещества, поверхностно-активные вещества, коагуляторы.

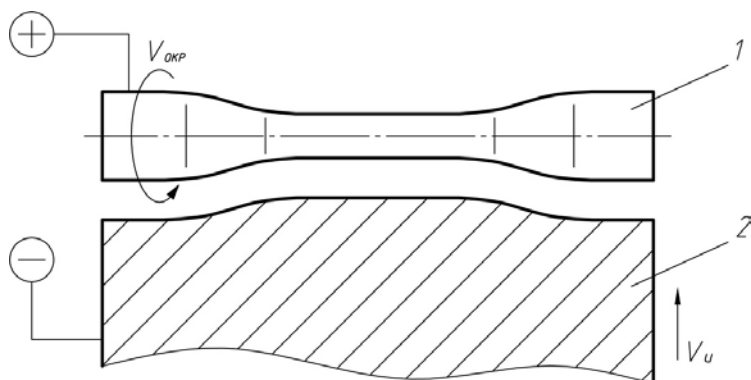


Рисунок 1.13 – Схема формообразования деталей вращения сложной формы

Например, для обработки коррозионно-стойких сталей используются электролиты на основе хлоридов натрия и калия с суммарной концентрацией до 40 % или на основе сульфата натрия концентрацией до 15 %. Напряжение при размерной электрохимической обработке сталей составляет 9–12 В. Плотность тока – 10–20 А/см². Величина межэлектродного зазора определяется необходимой точностью обработки. Для достижения точности 0,05–0,15 мм величина межэлектродного зазора должна составлять 0,03–0,1 мм. Максимальная точность обработки достигается при стабилизации параметров обработки и составляет 5 мкм [71].

Шероховатость заготовки после размерной электрохимической обработки материала с заданными физико-химическими свойствами зависит от состава электролита, его температуры, скорости подачи электролита через межэлектродный промежуток, а также анодной плотности тока. При размерной электрохимической обработке в основном высота микронеровностей составляет $Ra = 2,5–0,63$ мкм [71].

В случае применения размерной электрохимической обработки при формообразовании концентраторов-инструментов метод может обеспечить высокие скорости размерного съема материала при относительно низких энергетических затратах. Однако метод имеет ряд существенных недостатков. К ним следует отнести необходимость изготовления электрода-инструмента, повторяющего форму

концентратора-инструмента, необходимость прокачивания электролита через межэлектродный промежуток, а также необходимость обеспечения равномерного зазора по всей длине формируемого концентратора-инструмента. Также недостатком метода размерной электрохимической обработки при формообразовании длинномерных изделий малого диаметра, таких как концентраторы-инструменты, является разогрев металла и изменение его структуры вследствие теплового действия тока. Кроме того, концентраторы-инструменты, получаемые методом размерной электрохимической обработки, будут иметь низкое качество поверхности из-за растравливания металла по границам зерен. Глубина растравливания при размерной электрохимической обработке достигает 20–30 мкм [72].

1.2.4 Электрохимическое полирование и электролитно-плазменная обработка поверхностей изделий сложной форм

Рассмотренные выше способы формообразования сложнопрофильных поверхностей малого диаметра имеют значительные недостатки, что не позволяет применять их для получения качественных концентраторов-инструментов с комплексом высоких эксплуатационных характеристик. Поэтому в качестве альтернативных методов формообразования концентраторов-инструментов рассмотрены электрохимическое полирование и электролитно-плазменная обработка. Особенностью данных методов является возможность обработки поверхностей сложной формы, отсутствие силового и термического воздействия на деталь в процессе обработки, возможность обработки материалов вне зависимости от их прочностных характеристик [73].

Электрохимическое полирование. Электрохимическое полирование – одна из разновидностей анодной обработки металлов, в результате которой происходит электрохимическое растворение поверхностного слоя металла, удаляется дефектный слой, образовавшийся при проводившихся ранее механических или термических операциях, и формируется новый поверхностный слой, с меньшей высотой микронеровностей, сглаженным рельефом поверхности, не содержащий трещин, инородных включений, скрытых дефектов

[73]. Электрохимическое полирование применяется в качестве подготовительной операции перед нанесением покрытий, для снятия мелких заусенцев со штампованных изделий, для декоративной отделки деталей сложной формы. Наиболее широко применяется для обработки коррозионно-стойкой стали и алюминия [73].

В результате электрохимического полирования в зависимости от обрабатываемого металла достижимое значение шероховатости поверхности составляет Ra 0,04–0,025 мкм [72].

Основным механизмом сглаживания поверхности при электрохимическом полировании считается интенсивное растворение металла на вершинах микронеровностей вследствие концентрирования на них электрического тока [74].

Важным преимуществом электрохимического полирования является то, что детали и изделия после обработки приобретают более высокие эксплуатационные характеристики – повышенные предел выносливости, длительную прочность, сопротивление усталости, предел упругости, пониженный коэффициент трения и износ трущихся деталей, повышенные электромагнитные свойства и коррозионную стойкость [73, 75].

В настоящее время основой применяющихся электролитов для электрохимического полирования являются фосфорная и серная кислоты. В таких электролитах обрабатываются стали, алюминиевые и медные сплавы [72]. Наиболее универсальными для достижения высокого качества полирования сталей различных марок являются трехкомпонентные фосфорносернохромовокислые электролиты (H_3PO_4 – 40–45 %, H_2SO_4 – 25–27 %, CrO_3 – 4–5 %). Обработка ведется при температуре электролита 75–90 °С при плотности тока 30–60 А/дм², напряжении 10–20 В. Наибольшее повышение блеска поверхности коррозионно-стойкой стали достигается в первые 3–5 мин обработки [76].

Наиболее благоприятные условия для полирования титана создаются в электролите, содержащем H_3SO_4 – 50–65 %, HNO_3 – 7–16 %, HF – 20–30 %. Обработка проводится при температуре 20–40 °С, плотности тока 80–100 А/дм², напряжении 8–15 В [76].

Скорость съема металла при электрохимическом полировании составляет 2–10 мкм/мин [74, 77]. Скорость съема зависит от плотности тока, длительности полирования, температуры электролита,

состава электролита, интенсивности перемешивания, состава и состояния металла, положения изделия в ванне [74].

Применение агрессивных электролитов на основе кислот является основным недостатком процесса электрохимического полирования. Обработка часто осуществляется при температурах электролита, близких к кипению, что приводит к выделению вредных паров и газов. Кроме того, недостатком кислотных электролитов является их высокая стоимость, а также большие затраты, связанные с их утилизацией.

Электролитно-плазменная обработка. В качестве альтернативы электрохимическому полированию в промышленности последние 20 лет для повышения качества поверхности широко используется метод электролитно-плазменной обработки (ЭПО) металлических поверхностей [78], известный также как электроимпульсная полировка или электролитно-разрядная обработка. 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 75–90 °С. Продолжительность обработки обычно составляет 3–5 мин [79]. При этом достигается яркий металлический блеск, высокая чистота и гляцевание поверхности, снятие заусенцев, качественная подготовка и модификация поверхности для последующего нанесения разнообразных покрытий [80]. В работе [81] отмечается, что производительность и экономическая эффективность технологических операций при ЭПО в 5–6 раз выше, чем при электрохимическом способе полирования в растворах кислот.

В процессе ЭПО под действием рабочего напряжения вокруг погруженного в электролит изделия возникает устойчивая парогозовая оболочка и по всей обрабатываемой поверхности происходят импульсные электрические разряды [81]. К возникновению эффекта полирования приводит совместное воздействие на поверхность детали химически активной среды и электрических разрядов. Образование парогозовой оболочки и протекание процесса ЭПО происходит в области напряжений 200–350 В. Плотность тока при ЭПО составляет 0,1–0,3 А/см² [81].

До настоящего времени отсутствует единое мнение о механизме сглаживания микронеровностей в процессе ЭПО. В работах [79] и [81] механизм сглаживания связывается с возрастанием напряженности электрического поля на выпуклых участках электролита, а также вблизи микровыступов на аноде. Поэтому возникновение электрических разрядов наблюдается преимущественно на вершинах микровыступов, а формирование микропрофиля, происходит за счет их сглаживания. Однако в работе [82] показано, что парогазовая оболочка в процессе ЭПО оказывает равновероятное воздействие на все микровыступы поверхности вне зависимости от их высоты. Соответственно пробой парогазовой оболочки и сглаживание микронеровностей происходит с равной вероятностью как на вершинах, так и во впадинах микропрофиля обрабатываемой поверхности в областях случайных неоднородностей электрического поля, обусловленных подвижностью парогазовой оболочки [83].

Для обработки материалов применяются различные электролиты, а их оптимальный состав тесным образом взаимосвязан с химическим составом обрабатываемого материала [81]. Причина этого явления до настоящего времени не вполне изучена. При обработке применяются водные растворы солей концентрацией не выше 10 %. Например, коррозионно-стойкая сталь, содержащая 70 % железа, хорошо полируется в растворе сульфата аммония при концентрациях от 1 до 10 %, в то же время данный раствор не полирует углеродистые (нелегированные) стали. Углеродистые стали хорошо обрабатываются в электролитах на основе хлорида аммония [81].

В последнее время разработан ряд электролитов для полировки цветных металлов и сплавов. Для обработки меди и медных сплавов используется электролит на основе сульфата аммония с добавлением трилона Б в качестве поверхностно-активного вещества [84]. Титановые сплавы обрабатываются в растворах фторида калия и фторида аммония [85], алюминий и его сплавы – в растворах хлористого калия с добавлением щавелевой кислоты и глицерина [86].

Обзор применяемых электролитов показывает, что ЭПО является экологически чистым и безвредным процессом. Применение дешевых и безопасных для персонала и окружающей среды электролитов является основным преимуществом ЭПО перед электрохимической полировкой.

Важнейшей характеристикой процесса ЭПО является производительность. Технологическими параметрами, оказывающими влияние на производительность ЭПО, являются концентрация электролита, температура электролита, напряжение тока и глубина погружения заготовки [81]. В работе [87] установлено, при ЭПО низколегированных сталей в хлорамонистом электролите на производительность полирования наибольшее влияние оказывает температура электролита. Повышение температуры электролита с 40 до 90 °С приводит к снижению съема металла в 3,8–4 раза. При этом зависимость имеет нелинейный характер. В среднем уменьшение съема металла при увеличении температуры электролита на каждые 10 °С составляет от 3,8 % для диапазона температур 40–50 °С до 63 % для диапазона температур 80–90 °С [87].

Для хлористоаммонийного электролита отмечено крайне незначительное влияние рабочего напряжения на съем металла: увеличение рабочего напряжения на каждые 30 В приводит к снижению съема металла в среднем на 1,0–1,5 %. При обработке коррозионно-стойких сталей снижение съема металла при повышении напряжения на каждые 30 В составляет 7–8,6 %. При этом скорость съема составляет 2,75–4 мкм/мин на сторону для 5 % раствора сульфата аммония [87].

При увеличении глубины погружения заготовки на каждые 100 мм происходит увеличение съема металла на 5–9 %, причем зависимость носит линейный характер [87].

В работе [81] показано, что при обработке стали X18H10T в электролите на основе сульфата аммония при температуре электролита 70 °С в диапазоне рабочего напряжения 270–310 В наибольшая величина съема достигается при концентрации электролита 4 %. В тоже время в работе [87] установлено, что при обработке стали 20X13 в таком же электролите при температуре 70 °С при рабочем напряжении 310 В максимальный съем металла достигается при концентрации 6 %. По-видимому, это отличие связано с различным химическим составом исследуемых материалов.

Производительность обработки может быть увеличена за счет добавления вспомогательных компонентов в основной электролит. В работе [87] разработан электролит на основе серноокислого аммония с добавкой лимонной кислоты концентрацией 0,5–3 %, обеспе-

чивающей повышение производительности обработки в 2,5–5,6 раза. Положительное действие лимонной кислоты состоит в том, что она, являясь органическим комплексообразователем, способствует переводу окислов металлов с поверхности анода в электролит в виде растворимых комплексных соединений, предотвращая пассивацию поверхности анода [87].

Как и электрохимическая полировка, ЭПО оказывает влияние на изменение структуры и свойств поверхностного слоя материала. Причем эти изменения не связаны с температурным воздействием. Известно [81], что ЭПО в режиме полирования не приводит к значительному повышению температуры анода. Так при температуре электролита 80 °С температура анода не превышает 180 °С. С дальнейшим увеличением температуры электролита происходит снижение температуры анода [81].

В работах [83] и [88] исследовалось влияние ЭПО на изменение фазового состава сталей 20Х13 и 12Х18Н10Т на поверхности заготовки при различных значениях рабочего напряжения в электролите на основе сульфата аммония с добавлением и без добавления органических комплексообразователей. Установлено, что обработка без комплексообразователя приводит к преимущественному растворению феррита для стали 40Х13 и мартенсита для стали 12Х18Н10Т. Введение в электролит органического комплексообразователя приводит к выравниванию скоростей растворения всех фазовых составляющих.

В работе [87] исследовалось влияние ЭПО на распределение микротвердости в поверхностном слое сталей 20, У8А и 40Х13 после различных режимов термообработки. Установлено, что после ЭПО закаленных образцов из сталей У8А и 40Х13, а также отожженной стали 40Х13 микротвердость поверхностного слоя не отличается от микротвердости основного металла. Однако для стали У8А в отожженном и нормализованном состоянии, а также для стали 20 отмечено снижение микротвердости поверхностного слоя на величину от 150 до 500 МПа на глубину до 30 мкм. Снижение микротвердости поверхности углеродистых сталей связывается с обезуглероживанием поверхности в электролите, содержащем хлористый аммоний. При этом автор отмечает, что электролит, содержащий серноокислый аммоний, не вызывает обезуглероживания по-

верхности коррозионно-стойкой стали и снижения за счет этого микротвердости поверхности.

ЭПО обеспечивает повышение коррозионной стойкости поверхностного слоя. В исследованиях [89, 90] установлено, что ЭПО аустенитной стали 08X18H10T обеспечивает повышение потенциала коррозии по сравнению с механическим полированием. Средние значения потенциалов коррозии для ЭПО и механического полирования составили соответственно 832 мВ и 380 мВ. В работах [91, 92] установлено, что ЭПО коррозионно-стойкой стали 20X13 приводит к снижению скорости коррозии по сравнению с электрохимическим полированием на 9,1 %, а по сравнению со шлифованием на 40 %. Коррозионная стойкость является одной из основных эксплуатационных характеристик всех медицинских имплантатов и инструментов вне зависимости от их назначения. Поэтому повышение коррозионной стойкости в результате ЭПО является одним из важнейших аргументов для применения процесса в качестве операции формообразования концентраторов-инструментов.

В работах [91, 92] приводятся данные о влиянии ЭПО на коэффициент трения. Отмечено, что за счет особо сформированного микропрофиля поверхности после ЭПО коэффициент трения понижается по сравнению со шлифованием на 25–35 % и по сравнению с механической полировкой на 8–13 %.

Кроме основных направлений применения ЭПО может использоваться в качестве подготовительной операции для нанесения гальванических покрытий. Так, в исследованиях [92, 93] показано, что ЭПО поверхности подложки из углеродистой конструкционной стали в течение 7 мин повышает прочность сцепления хромового покрытия с подложкой на 18 %. Повышение прочности сцепления авторы связывают с тем, что при ЭПО наряду со снижением шероховатости поверхности происходит уменьшение количества дефектных участков на поверхности подложки, устраняется направленная анизотропия магнитных свойств, полученная при предварительной механической обработке.

Проведенный обзор показывает, что существующие области применения метода ЭПО ограничиваются лишь обработкой поверхности, притуплением острых кромок и удалением заусенцев. Работы, связанные с процессом ЭПО, посвящены исследованиям геометрии формирующегося при ЭПО микропрофиля, исследованиям структуры и

свойств поверхности, процессов, происходящих в парогазовой оболочке, разработкой и оптимизацией электролитов. В то же время изучение процесса показало, что при увеличении продолжительности ЭПО возможно её применение для точной размерной обработки деталей вращения, в том числе и для формообразования ступенчатых концентраторов-инструментов [94]. Съем металла с обрабатываемой поверхности происходит со скоростью до 0,6 мм/ч. Исследования, направленные на применение ЭПО в качестве формообразующей операции, до настоящего времени не проводились. Имеющиеся результаты [87] описывают лишь характер влияния параметров ЭПО на производительность. К тому же в этой работе основная часть исследований проведена только для углеродистых сталей.

Применение размерной ЭПО для формообразования поверхностей концентраторов-инструментов не требует создания сложных схем обработки по сравнению с электрохимической размерной обработкой. Формообразование можно осуществлять в ванне-катоде без использования инструментов-электродов специальной формы. При этом в отличие от размерной электрохимической обработки, не требуется осуществлять прокачку электролита через межэлектродный промежуток. Кроме того, из-за сравнительно небольшой плотности тока в процессе ЭПО не возникает трудностей с обеспечением надежного токоподвода к обрабатываемой длинномерной заготовке.

Проведенный анализ показывает, что размерная ЭПО имеет следующие преимущества при формообразовании концентраторов-инструментов:

- размерная ЭПО позволяет обеспечить формообразование концентраторов-инструментов с равномерными по длине прочностными и акустическими характеристиками, соответствующими характеристикам исходной заготовки, поскольку ЭПО не оказывает силового и значимого температурного воздействия;

- применение ЭПО позволяет добиться повышения прочностных и акустических характеристик концентраторов-инструментов за счет удаления дефектного слоя, посторонних включений и достижения высокого качества поверхности при обработке;

- применение размерной ЭПО позволяет сформировать рабочий наконечник концентраторов-инструментов без дополнительной сварки или пайки;

- применение размерной ЭПО обеспечивает повышение коррозионной стойкости получаемых концентраторов-инструментов.

Кроме формообразования поверхности ЭПО может быть также использована в качестве промежуточной операции для удаления дефектных поверхностных слоёв между проходами волочения при изготовлении заготовки концентраторов-инструментов [95]. Результаты исследований структуры и свойств поверхностного слоя различных материалов [87–93] дают основания полагать, что применение ЭПО между проходами волочения позволит добиться улучшения структуры деформированного материала, и таким образом повысить как прочностные, так и акустические характеристики заготовки. Поскольку прочностные и акустические характеристики заготовки, получаемой многократным волочением, тесно связаны с состоянием поверхностного слоя и наличием растягивающих остаточных напряжений в материале, то для разработки оптимальных режимов волочения с промежуточной ЭПО необходимо также провести исследования влияния промежуточной ЭПО на изменение остаточных напряжений и исследования влияния ЭПО на состояние поверхности деформированного материала. Подобные исследования ранее не проводились.

ГЛАВА 2

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

2.1 Обоснование конструкции и материала концентратора-инструмента

Для расчета геометрии ультразвуковых концентраторов-инструментов совместно с кардиологами из РНПЦ «Кардиология» были проведены исследования анатомических особенностей подвздошных (бедренных) и брахиоцефальных (сонных) артерий 139 пациентов.

При операциях на подвздошных артериях (рисунок 2.1) максимальный угол изгиба концентратора-инструмента зависит от угла деления аорты, образуемого правой и левой бедренными артериями. Этот угол находится в пределах $20-90^{\circ}$. Общая длина подвздошного сегмента (бедренной артерии) может достигать 190 мм. Таким образом, для проведения концентратора-инструмента угол изгиба его рабочей части может достигать 160° . Гибкая часть таких концентраторов-инструментов должна иметь длину до 200 мм и диаметр 0,5–0,6 мм, что обеспечит необходимую гибкость для прохождения по извилистому руслу сосудов, и достаточную жесткость для проведения концентраторов-инструментов по сосуду.

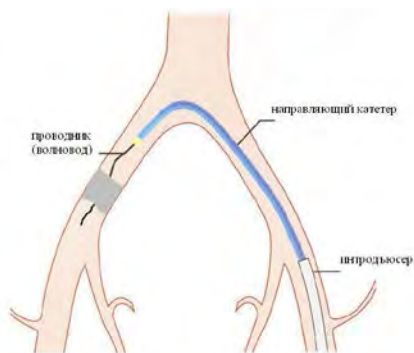


Рисунок 2.1 – Схема введения концентратора-инструмента в артерию

Морфометрическая оценка брахиоцефальных артерий показала, что на длине 300 мм рабочая часть концентратора-инструмента должна быть в состоянии выполнить минимум два изгиба: в области перешейка аорты не менее 55° и в области отхождения брахиоцефального ствола не менее 65° в области отхождения левой общей сонной артерии не менее 60° . Таким образом, длина дистальной части такого концентратора-инструмента должна составлять не менее 300 мм, ее диаметр для обеспечения достаточной прочности и гибкости должен быть не менее 0,5 мм. Максимальный диаметр концентратора-инструмента ограничивается диаметром катетера, через который производится его доставка к тромбу, и не должен превышать 1,8 мм.

На основании проведенного анализа в качестве базовых приняты конструкции концентратора-инструмента в виде ступенчатого цилиндрического стержня с круглым сечением и перепадом диаметров от 1,8 до 0,5 мм. Такая конструкция концентратора-инструмента обеспечивает усиление амплитуды продольных колебаний в 2,5–3 раза. На длине каждого диаметра ступенчатого концентратора-инструмента укладывается целое число полуволн. Ступенчатая конструкция (2–4 ступени) обеспечивает одновременно высокий коэффициент усиления передаваемых колебаний, минимальные потери и возможность прохождения концентратора-инструмента по извилистым сосудам за счет высокой гибкости дистальной части, имеющей длину до 300 мм и диаметр 0,5–1,0 мм. Диаметр проксимальной ступени концентратора-инструмента составляет 1,5–1,8 мм. Общая длина концентратора-инструмента составляет 250–1200 мм. Для снижения концентрации напряжений между дистальной ступенью концентратора-инструмента и рабочим сферическим наконечником диаметром 1,5–1,8 мм выполняется плавный переход (рисунок 2.2).

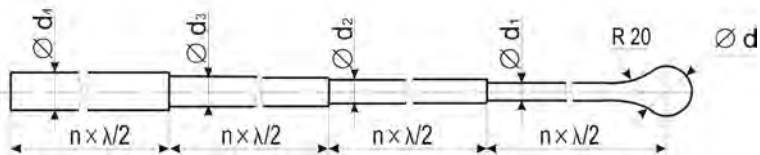


Рисунок 2.2 – Ступенчатый концентратор-инструмент

Некоторые возможные варианты исполнения ступенчатых ультразвуковых концентраторов-инструментов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Размеры ступенчатых концентраторов-инструментов

№ п/п	d ₁ , мм	d ₂ , мм	d ₃ , мм	d ₄ , мм	d, мм
1	–	0,65	1,19	1,8	1,8
2	0,7	0,95	1,35	1,8	1,8
3	–	0,5	0,9	1,5	1,5

Для эффективной и надежной работы концентраторов-инструментов важен не только расчет размеров, но и выбор материала с оптимальными акустическими и механическими характеристиками.

Рабочей средой концентраторов-инструментов является тромб, который в некоторых случаях представляет собой прочное кальцинированное образование протяженностью до 20 см [5]. Концентраторы-инструменты в процессе эксплуатации находятся в сложном состоянии, которое характеризуется значительными знакопеременными нагрузками в сочетании с воздействием агрессивной биологической среды организма.

В качестве материала для изготовления концентраторов-инструментов из соображений высокой прочности и коррозионной стойкости необходимо использовать прочные стали и сплавы, рекомендованные к применению при изготовлении изделий медицинского назначения. К таким материалам относятся коррозионностойкая аустенитная сталь 12Х18Н9 и ее аналоги, а также титан и его сплавы.

Наилучшим материалом для изготовления стержневых концентраторов-инструментов с точки зрения получения максимальной амплитуды колебательной скорости является титан и его сплавы, так как при достаточно большой механической прочности эти материалы обладают сравнительно низким волновым сопротивлением, а также малым коэффициентом поглощения.

Однако если сравнить акустические характеристики титана ВТ1 и коррозионностойкой стали 12Х18Н9, то разница между ними весьма незначительная. Так скорость звука в титане равна 5072 м/с,

а в стали 5039 м/с, коэффициент потерь ϵ на частоте 18–25 кГц составляет соответственно 0,00014 и 0,00044 [96].

Прочностные характеристики коррозионностойкой стали 12Х18Н9 после деформации со степенью обжатия 80–90 % [97] и титановых сплавов ВТ6 и ВТ9 после закалки и старения [98] и [99] приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики материалов

Показатели	12Х18Н9	ВТ6	ВТ9
Плотность, г/см ³	7,8	4,5	4,5
Предел прочности при растяжении, МПа	1400–1700	1050–1080	1290–1310
Предел выносливости, МПа	490–520	510–530	500–520

Как видно из таблицы 2.2 титановые сплавы по механическим характеристикам не превосходят коррозионностойкую сталь 12Х18Н9. Единственным преимуществом титановых сплавов является его меньшая плотность по сравнению со сталью. Соответственно масса рабочего наконечника концентратора-инструмента из титанового сплава будет меньше, чем у наконечника из стали. Это снижает инерционные силы при колебательном процессе и, таким образом, увеличивает надежность концентратора-инструмента при работе.

Недостатком титановых сплавов является плохая обрабатываемость из-за склонности к налипанию на инструмент и задиранию из-за низкой теплопроводности и плохих антифрикционных свойств [100, 101]. Даже по сравнению с обработкой коррозионностойких аустенитных сталей при обработке титановых сплавов скорость резания снижают в 4–6 раза [102].

Сопrotивление деформированию при обработке титановых сплавов и коррозионностойких аустенитных сталей давлением выше, чем при обработке конструкционных сталей или медных и алюминиевых сплавов, что объясняется их высокой прочностью. Предел текучести этих материалов почти равен пределу прочности, что также затрудняет обработку давлением. В целом титан и его сплавы обрабатываются давлением примерно так же, как и коррозионностойкие стали аустенитного класса [103]. Однако титан и его сплавы обладают высокой чувствительностью к примесям кислоро-

да, азота, водорода и некоторых других элементов, что в сильной степени снижает его пластичность [104].

Химическая и электрохимическая обработка титана и его сплавов связана с некоторыми трудностями из-за образования на поверхности пассивной окисной пленки, которая препятствует растворению металла [105]. При этом в отличие от обработки коррозионностойких аустенитных сталей для обработки титана и его сплавов используют вредные электролиты на основе растворов плавиковой, соляной и азотной кислот.

С точки зрения коррозионной стойкости сталь 12X18H9 практически не уступает титану [106]. Сталь 12X18H9 обладает хорошим сочетанием обрабатываемости, механических свойств и коррозионной стойкости.

Значительным недостатком титана и его сплавов является высокая стоимость и недоступность в широком диапазоне типоразмеров профилей. В то время как коррозионно-стойкие аустенитные стали имеют низкую стоимость (в 5 раз дешевле титана) и большую доступность в виде прутков, проволоки, труб, листов, полос различных типоразмеров, благодаря чему широко применяются в медицинской, пищевой и химической промышленности.

На основании вышесказанного, учитывая, что сталь 12X18H9 имеет достаточно высокую коррозионную стойкость, высокие прочностные и акустические характеристики, практически не уступающие характеристикам титана и его сплавов, а также, учитывая плохую обрабатываемость титана, его стоимость и дефицитность, очевидно, что для изготовления концентраторов-инструментов целесообразно использовать коррозионнотойкую сталь аустенитного класса 12X18H9 или ее аналоги. К тому же, как было отмечено ранее в главе 1, стали такого класса хорошо подвергаются ЭПО в дешевом и безопасном электролите на основе сульфата аммония.

2.2 Методы исследования структуры и свойств поверхностного слоя деформированного материала

При подготовке образцов к металлографическим и дюрOMETрическим исследованиям использовались цилиндрические заготовки

из стали 12Х18Н9 диаметром 6 мм. После разупрочняющей закалки при температуре 1100 °С с охлаждением в воду и удаления окалины путём травления в 40 % растворе серной кислоты образцы волочили с суммарной степенью обжатия 66 %. Конечный диаметр полученных образцов составлял 3,5 мм.

Для выполнения рентгеноструктурного анализа и электронно-микроскопических исследований поверхностного слоя требовалась вырезка тонких пластинок толщиной около 50 мкм. Поскольку вырезка пластинок такой толщины из круглого образца диаметром 3,5 мм затруднена, то для проведения исследований использовались образцы, полученные прокаткой с суммарной степенью обжатия 66 % в шесть переходов.

Полученные образцы подвергали ЭПО с продолжительностью от 1 до 10 мин. Как при выполнении данного исследования, так и в дальнейшем в работе, для ЭПО в качестве электролита использовался, широко применяемый в практике обработки коррозионно-стойких сталей электролит на основе 4 % раствора сульфата аммония в воде, без применения повышающих производительность обработки органических добавок, описанных в работе [87]. Как отмечалось ранее в главе 1, такая концентрация электролита обеспечивает максимальную производительность при обработке стали 12Х18Н10Т [81].

Рабочее напряжение составляло 300 В, температура электролита – 80 °С, глубина погружения – 20 мм. Величина съема металла для каждого из образцов приведена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Продолжительность обработки и величина съема металла с поверхности образцов

№ обр.	Продолжительность ЭПО, мин	Величина съема (на диаметр), мкм
Исх.	0	0
1	1	5
2	3	15
3	5	25
4	10	50

Металлографические исследования образцов проводились на световом микроскопе «Reichert». Для исследования влияния ЭПО деформированного материала на изменение фазового состава и па-

раметров тонкой структуры использовался метод рентгеновской дифракции и электронно-микроскопический анализ.

Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре общего назначения ДРОН-3.0 в CuK_α монохроматизированном излучении, вторичная монохроматизация осуществлялась пиролитическим графитом с вращением образца в собственной плоскости. Электронно-микроскопические исследования поверхностных слоев после ЭПО проводилось на просвечивающем электронном микроскопе ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ.

Для подготовки образцов проводилась прецизионная отрезка исследуемого слоя с последующим односторонним механическим и электролитическим утонением. Разрезка на тонкие пластины толщиной 0,3 мм осуществлялась на прецизионном отрезном станке с помощью алмазных дисков со скоростью 500 об/мин с водяным охлаждением. Затем проводилось одностороннее механическое утонение. Исследуемые образцы шлифовались последовательно на шлифовальных бумагах зернистостью P120, P320, P600 и полировались – на бумажном круге с использованием алмазных полировочных паст зернистостью 7/5, 5/3, 3/2 мкм. Толщина образцов после механического утонения составляла 0,05 мм. Поверхность образцов после механического утонения имела зеркальный вид без глубоких рисок и царапин. Для снятия наклепа, полученного при механическом утонении, проводилась односторонняя электрополировка, при которой исследуемая поверхность защищалась лаком. После электрополировки лак снимали с поверхности растворением.

Для определения фазового состава исследуемых образцов проводилась съемка полной рентгенограммы в непрерывном режиме с шагом по углу $0,1^\circ$. Интервал углов $2\theta = 20^\circ - 143^\circ$ выбирался с учетом нахождения линий предполагаемых α - и γ -фаз, включающих все линии карточки [33-0397] – $\gamma\text{-Cr}_{0.19}\text{Fe}_{0.7}\text{Ni}_{0.11}$ и карточки [06-0696] – $\alpha\text{-Fe}$ картотеки ASTM (электронная версия PCPDFWIN 2,0). Сбор и обработка информации осуществлялись с помощью программы «WinDif».

Для расчёта параметров тонкой кристаллической структуры выбирались линии двух порядков отражения от одной плоскости, которые для надежной регистрации имели достаточную интенсивность и не совпадали с другими отражениями [107].

Для $\gamma\text{-Cr}_{0.19}\text{Fe}_{0.7}\text{Ni}_{0.11}$ такими линиями являлась пара (111)–(220) направления [111], и (200)–(400) направления [100]; для прецизионного расчета параметра решетки выбиралась линия (400) на самых больших углах.

Параметры рентгеновской съемки:

– для определения параметров тонкой структуры линии (111), (220) и (400) снимались в дискретном режиме;

– угловой интервал измерения – 2θ каждой линии определялся по ее положению из полного рентгеновского спектра для проведения фазового анализа как минимум $\pm 4^\circ$ в обе стороны от положения максимальной интенсивности линии с целью получения полного профиля линии;

– шаг съемки по углу – $0,05^\circ$;

– время экспозиции на каждый шаг измерения – τ устанавливался на основе данных съемки полного спектра, интенсивности каждой линии по данным карточки ASTM.

Для расчета параметров тонкой структуры использовался специальный пакет программ гармонического анализа профиля рентгеновской линии (ГАРФЛ), позволяющий автоматизировать рентгенодифрактометрические исследования параметров тонкой структуры.

Вычислительный алгоритм процедуры определения параметров тонкой структуры включал:

– предварительную обработку профиля с удалением дублетных линий $\text{CuK}\alpha_2$, разделением наложенных линий, отсечением фона, поиском начала и конца дифракционного профиля, вычислением центра тяжести пика;

– выделение функции физического уширения – $\beta_{1/2}$, рад;

– определение коэффициентов Фурье профилей образца и эталона;

– определение среднего размера областей когерентного рассеяния – ОКР ($D_{\text{эфф.}}$), Å;

– вычисление величины относительной среднеквадратичной микродеформации – $\sqrt{\langle E^2 \rangle}$ и плотности дислокаций в объеме кристалла, ρ , см^{-2} .

Прецизионное определение параметров решетки кубической сингонии производилось, исходя из положения центра тяжести линии (400), по формуле:

$$a^2 = \frac{\lambda^2}{4} \left(\frac{H^2 + K^2 + L^2}{\sin^2 \theta} \right), \quad (2.1)$$

где λ – длина волны $\text{CuK}\alpha_1$ излучения (1,54056 нм);

H, K, L – индексы Миллера,

θ – центр тяжести линии образца, рад.

Распределение относительной среднеквадратичной микродеформации ($\langle E^2 \rangle^{1/2}$) в зависимости от расстояния в кристаллической решетке описывается прямолинейной (плоскораспределенной микродеформацией, Pr), экспоненциальной (с хаотическим распределением дислокаций, E), степенной (с отсутствием хаоса и скоплением дислокаций в стенках, C) моделями.

Измерения микротвердости выполнялись на микротвердомере «Micromet-II» с нагрузкой 25 г методом косого шлифа.

2.3 Расчет режимов получения заготовки волочением, совмещенным с электролитно-плазменной обработкой

По данным [108] технологический процесс волочения высокопрочной коррозионностойкой проволоки включает 2–3 передела. Для волочения используют катанку с исходным диаметром 6–8 мм. Единичные обжатия $\delta_{\text{ед.}}$ составляют 15–23 %, суммарные обжатия достигают $\delta_{\text{сум.}} = 90$ %. Кратность волочения составляет $n = 7$ –8. Между переделами проводят разупрочняющую термообработку – нагрев до 1100 °С с охлаждением в воде. Удаление окалины производят в растворах серной кислоты или в смеси азотной и соляной кислот. В качестве смазки используют мыльный порошок или стружку с высоким содержанием жиров.

Для исследования влияния промежуточной ЭПО между проходами волочения на прочностные и акустические характеристики заготовки для изготовления концентраторов-инструментов разработан маршрут последнего передела волочения, включающий семь

проходов и обеспечивающий суммарное обжатие $\delta_{\text{сум.}} = 80\%$. Разработанный маршрут волочения для подготовки образцов приведен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Маршрут волочения для подготовки образцов

№ про- хода	Исх. диаметр, $d_{\text{исх}}$, мм	Кон. диаметр, $d_{\text{кон}}$, мм	Ед. об- жатие $\delta_{\text{ед.}}$	Сум. обжатие $\delta_{\text{сум.}}$	Коэф. вытяжки, K
1	3,98	3,55	0,20	0,20	1,26
2	3,55	3,15	0,21	0,37	1,27
3	3,15	2,82	0,20	0,50	1,25
4	2,82	2,50	0,21	0,61	1,27
5	2,50	2,24	0,20	0,68	1,25
6	2,24	2,00	0,20	0,75	1,25
7	2,00	1,80	0,19	0,80	1,23

Для волочения использовался цепной волочильный стан. Скорость волочения составляла 20 м/мин. Угол рабочего конуса используемых волок составлял 8° , материал волок – сплав ВК6 [109]. В качестве смазки использовалось натриевое мыло. В качестве исходной заготовки использовался калиброванный прутки из стали 12Х18Н9 с исходным диаметром 4 мм. Отрезки прутков подвергались закалке при температуре 1100 °С с охлаждением в воде, окалина травилась в растворе серной кислоты.

Образцы готовились методом традиционного волочения, а также методом волочения с промежуточной ЭПО. Методом волочения с промежуточной ЭПО готовились четыре группы образцов с различной продолжительностью ЭПО между каждым проходом. Продолжительность промежуточной ЭПО составляла 1, 3, 5 и 10 мин. При этом величина съема на диаметр составляла 0,005; 0,015; 0,025 и 0,05 мм соответственно. ЭПО выполнялась в соответствии с параметрами, применявшимися при подготовке образцов в разделе 2.2.

2.4 Метод определения остаточных напряжений в материале

Исследование влияния ЭПО между проходами волочения на распределение остаточных напряжений в образцах проводилось методом замера прогибов [110]. При определении остаточных напряжений методом замера прогибов использовалась теория стержней,

основанная на гипотезе плоских сечений. Остаточное напряженное состояние предполагалось одноосным [110].

Для определения остаточных напряжений методом замера прогибов обычно используются образцы в виде стержней прямоугольного сечения, которые вырезаются из деталей более сложной конфигурации. Для определения остаточных напряжений постепенно удаляется слой материала ABCD (рисунок 2.3), находящийся в зоне постоянных по длине стержня напряжений. В цельном стержне они действуют по граням АВ и CD [110].

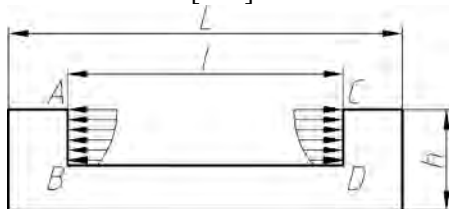


Рисунок 2.3 – Схема выявления остаточных напряжений путём последовательного удаления слоёв металла

Удаление слоя металла ABCD эквивалентно приложению к этим граням равных и противоположно направленных напряжений. Предполагается также, что продольные волокна друг на друга не давят и поэтому поверхность BD свободна от напряжений. В стержне на расстоянии a от верхней грани действуют остаточные напряжения $\sigma(a)$ (рисунок 2.4). В результате удаления полосы толщиной a в рассматриваемой площадке возникнут дополнительные напряжения $\sigma_D(a)$, и результирующее напряжение в слое, отстоящем на расстоянии a , окажется равным [110]:

$$\sigma^*(a) = \sigma(a) + \sigma_D(a). \quad (2.2)$$

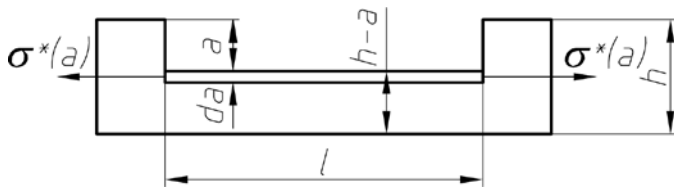


Рисунок 2.4 – Схема для определения напряжения в слое, отстоящем на расстоянии a от верхней грани стержня

Таким образом, дальнейшая задача сводится к определению результирующего напряжения $\sigma^*(a)$ и дополнительного напряжения $\sigma_D(a)$, возникающего в результате удаления предыдущих слоёв. Результирующее напряжение $\sigma^*(a)$ определяется на основании расчета момента, вызвавшего прогиб f , а дополнительное напряжение на основании суммирования приращений напряжений от снятия всех предыдущих слоёв [110].

Конечная расчетная формула для определения величины истинных остаточных напряжений имеет следующий вид [110]:

$$\sigma(a) = \frac{4E}{3l^2} \left((h-a)^2 \frac{df(a)}{da} - 4(h-a)f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right) \quad (2.3)$$

где E – модуль упругости, МПа;

l – расчетная длина, мм;

h – исходная высота профиля, мм.

В формуле (2.3) интеграл $\int_0^a f(\xi) d\xi$ определяет часть дополнительных напряжений, возникающих при удалении предыдущих слоёв.

Для определения остаточных напряжений по формуле (2.3) надо знать не только величину прогиба в данный момент, но и располагать зависимостью прогиба f от толщины a снятого слоя. Эту зависимость получают экспериментально и представляют в координатах $f - a$. Далее на основе анализа этой зависимости определяют значения всех компонентов формулы (2.3).

Для вычисления производной $\frac{df(a)}{da}$ используется параболическая аппроксимация:

$$\begin{aligned} \frac{df(a_i)}{da} = & f_{i-1} \left(\frac{-\Delta_{i+1}}{\Delta_i(\Delta_i + \Delta_{i+1})} \right) + f_i \left(\frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{\Delta_i \Delta_{i+1}} \right) + \\ & + f_{i+1} \left(\frac{\Delta_i}{\Delta_{i+1}(\Delta_i + \Delta_{i+1})} \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

где $\Delta_i = a_i - a_{i-1}$ – толщина слоя между сечениями a_i и a_{i-1} .

Формула (2.4) справедлива для всех значений a_i , кроме двух крайних. Для начального значения при $i = 0$, $a_0 = 0$, $f_0 = 0$ применяется формула:

$$\frac{df(0)}{da} = f_1 \left(\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta_1 \Delta_2} \right) + f_2 \left(\frac{-\Delta_1}{\Delta_2 (\Delta_1 + \Delta_2)} \right). \quad (2.5)$$

Для последнего снятия слоёв $i = n$ применяют формулу:

$$\begin{aligned} \frac{df(a_n)}{da} = & f_{n-2} \left(\frac{\Delta_n}{\Delta_{n-1} (\Delta_{n-1} + \Delta_n)} \right) + f_{n-1} \left(\frac{-(\Delta_{n-1} + \Delta_n)}{\Delta_{n-1} \Delta_n} \right). \\ & + f_{n-1} \left(\frac{\Delta_n + (\Delta_{n-1} + \Delta_n)}{\Delta_n (\Delta_{n-1} + \Delta_n)} \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Вычисление интеграла $\int_0^a f(\xi) d\xi$ не требует высокой точности, поэтому на практике его рассчитывают по правилу трапеций:

$$\begin{aligned} \int_0^a f(\xi) d\xi = & \sum_{i=1}^n \Delta_i \frac{1}{2} (f_{i-1} + f_i) = \frac{1}{2} \Delta_1 (f_0 + f_1) + \\ & + \frac{1}{2} \Delta_2 (f_1 + f_2) + \dots + \frac{1}{2} \Delta_n (f_{n-1} + f_n) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Для определения остаточных напряжений в образцах методом замера прогибов круглый профиль приводился к прямоугольному путем шлифовывания лысок. Такой метод определения остаточных напряжений в круглом профиле имеет некоторые неточности, поскольку напряжения определяются не в кольцевых слоях, а в плоских. Величина напряжений в каждом удаляемом плоском слое будет включать долю остаточных напряжений смежных слоёв (рисунки 2.5). Точность определения напряжений зависит от толщины

приведенного профиля. Чем меньше толщина приведенного прямоугольного профиля, тем точнее значения определяемых остаточных напряжений. К тому же в данном исследовании важно не измерение абсолютных значений остаточных напряжений, а их относительное изменение в результате применения промежуточной ЭПО между проходами волочения. Поэтому применение метода позволяет с достаточной степенью точности определить значения остаточных напряжений в кольцевых слоях образцов, а также оценить влияние промежуточной ЭПО при волочении на изменение остаточных напряжений.

Для шлифования лысок на круглом профиле, а также для последовательного удаления плоских слоёв с полученного приведенного профиля разработана специальная технологическая оснастка для плоскошлифовального станка. Схема оснастки приведена на рисунке 2.6. Технологическая оснастка состоит из плиты 1 толщиной 8 мм, на которой с помощью двух прижимов 2 крепится заготовка 3 в виде отрезка прутка. Для исключения осевого вращения концы прутка отгибались под углом 90° (П-образно). После шлифования первой лыски на глубину 0,7 мм заготовка поворачивается на 180° , а под лыской крепится опорная пластина 4 толщиной 0,7 мм. После шлифования второй лыски толщина полученного профиля составляет 0,4 мм. Шлифование лысок осуществлялось алмазным кругом зернистостью АМ28/20.

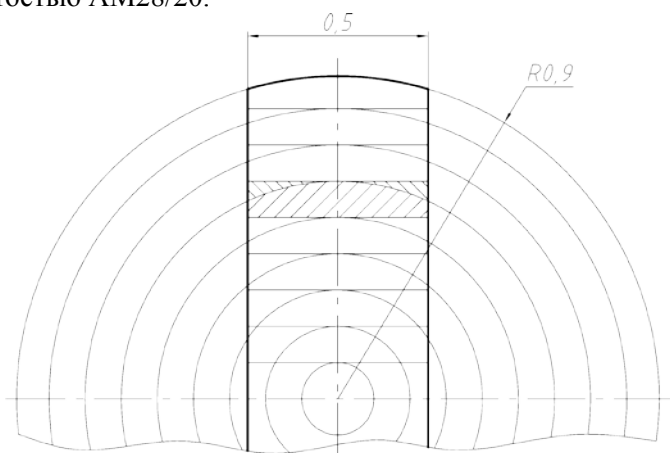


Рисунок 2.5 – Приведение круглого профиля к прямоугольному

Для исключения термического влияния на структуру материала поверхность образцов охлаждалась смазочно-охлаждающей жидкостью. После шлифования поверхность второй лыски полировалась с помощью войлочного круга до появления зеркального блеска.

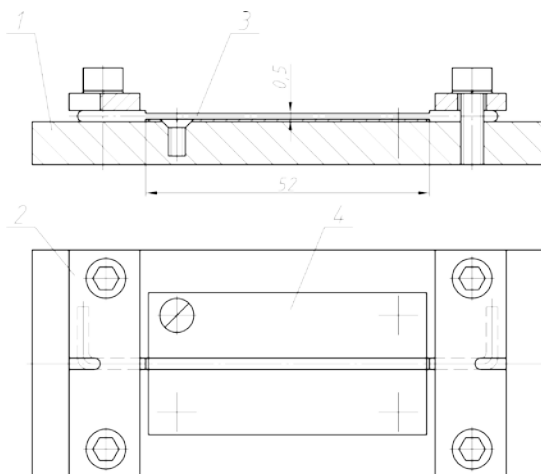


Рисунок 2.6 – Схема технологической оснастки для изготовления образцов

Для последовательного удаления слоёв с полученного прямоугольного профиля заготовку поворачивают на 90^0 таким образом, чтобы отогнутые концы были заведены в пазы прижимов 2. Опорную пластину 4 при этом убирают.

Для расчета остаточных напряжений подготовлено пять групп образцов: 1) волочение без ЭПО; 2) волочение с ЭПО 1 мин; 3) волочение с ЭПО 3 мин; 4) волочение с ЭПО 5 мин; 5) волочение с ЭПО 10 мин. Каждая группа включала девять образцов. После формирования прямоугольного профиля с целью дальнейшего определения величины прогиба на одну из сторон каждого образца при помощи микротвердомера наносились метки. Схема нанесения меток приведена на рисунке 2.7.

Для измерения величины прогиба использовался инструментальный микроскоп с дискретностью измерения 0,01 мм. Схема измерения приведена на рисунке 2.7. Величина прогиба равна сумме отклонений точек А и С от точки В:

$$f = \frac{1}{2}(f_A + f_C) \quad (2.8)$$

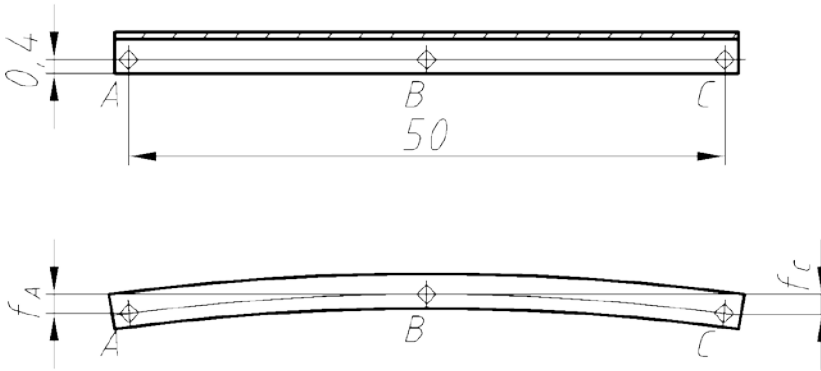


Рисунок 2.7 – Схема нанесения меток для измерения прогибов

После нанесения меток для каждой группы образцов выполнялось последовательное удаление слоёв. Толщина удаленных слоёв для каждого из образцов приведена в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Толщина удаленных слоёв

№ образца в группе	Толщина удалённого слоя, мм
1	0
2	0,04
3	0,13
4	0,20
5	0,31
6	0,43
7	0,59
8	0,69
9	0,80
10	0,90

2.5 Методы исследования прочностных и акустических характеристик материала

Исследование влияния ЭПО между проходами волочения на эксплуатационные характеристики материала проводилось путём сравнения усталостной прочности и акустических характеристик образцов, полученных традиционным волочением и волочением с промежуточной ЭПО. Для исследований использовались образцы длиной 250 мм и диаметром 1,8 мм.

Для создания ультразвуковых колебаний при исследовании акустических характеристик, а также циклических нагрузок при исследовании усталостной прочности использовался ультразвуковой генератор мощностью 80 Вт, позволяющий генерировать колебания частотой от 22 до 28 кГц (рисунок 2.8).

Для подключения к ультразвуковому преобразователю образцы припаивались припоем ПСр60 к переходному винту, изготовленному из стали 12Х18Н9.



Рисунок 2.8 – Ультразвуковой генератор для проведения испытаний на усталостную прочность

Испытания на усталостную прочность заключались в определении числа циклов, приводящих к разрушению образцов при задан-

ных величинах напряжений, и в определении предельного напряжения, при котором не происходило разрушение при максимальном числе циклов нагружения. Это число циклов, называемое базой испытаний, принимается равным для стали $N = 1 \cdot 10^7$. Испытание велось до базы, а предел выносливости определялся как наибольшее значение максимального напряжения цикла, при котором образец выдерживал базовое число циклов с малой степенью вероятности разрушения [111].

Зависимость максимальных напряжений, приводящих к разрушению образца при усталостных испытаниях, от числа циклов нагружения до момента разрушения представляет собой кривую, называемую кривой усталости или кривой Велера [112].

Величина напряжений, возникающих в стержне, при передаче ультразвуковых колебаний определялась по формуле [112]:

$$\sigma = A \frac{2\pi f E}{c}, \text{ МПа} \quad (2.9)$$

где A – амплитуда ультразвуковых колебаний, мм;

f – частота ультразвуковых колебаний, кГц;

E – модуль упругости материала, МПа (для стали 12Х18Н9 принимается равным $1,96 \cdot 10^5$ МПа);

c – скорость звука в материале, мм/с (для стали 12Х18Н9 принимается равной $5,17 \cdot 10^6$ мм/с).

Испытания проводились при частоте $f = 25 \pm 1$ кГц. Для каждого из уровней нагружения испытывались по три образца. Испытания начинались при величине нагружения, обеспечивающем в металле напряжения, величиной около 70 % от предела прочности при статическом нагружении. Далее величина нагружения постепенно уменьшалась до тех пор, пока не был достигнут уровень, при котором образец не разрушался после числа циклов, равного базе испытаний.

Исследование влияния ЭПО на затухание ультразвука проводилось путем оценки изменения интенсивности передаваемых ультразвуковых колебаний. Интенсивность передаваемых колебаний оценивалась калориметрическим методом, основанном на расчете количества теплоты, передаваемой в жидкость единицей излучающей

поверхности волноводной системы за единицу времени. Расчет интенсивности проводится по формуле [113]:

$$I = \frac{c \cdot m \cdot (T_2 - T_1)}{S \cdot t}, \text{ Вт/см}^2 \quad (2.10)$$

где c – удельная теплоемкость жидкости, Дж/кг·°С;

m – масса жидкости, кг;

T_1 – исходная температура жидкости, °С;

T_2 – конечная температура жидкости, °С;

S – эффективная площадь излучения, см²;

t – время воздействия ультразвука, с.

Из формулы (2.10) следует, что величина интенсивности ультразвука пропорциональна изменению температуры жидкости. Поэтому при проведении испытаний за критерий оценки изменения интенсивности принималось изменение температуры жидкости, подвергаемой ультразвуковой обработке. В качестве жидкости использовалась техническая вода. Образцы изготавливались аналогично образцам для испытаний на усталостную прочность.

В качестве ёмкости для воды использовалась пластиковая пробирка объемом 30 мл. Для снижения температурных потерь пробирка помещалась в теплоизолирующий кожух, изготовленный из пенопласта. При погружении образцов в пробирку при проведении испытаний пробирка закрывалась крышкой. Глубина погружения образцов в воду составляла 10 мм.

Испытания проводились на трёх уровнях мощности ультразвукового генератора, соответствующих следующим базовым значениям интенсивности излучения: 1 – 18 Вт/см²; 2 – 30 Вт/см²; 3 – 42 Вт/см². Температуру воды до и после ультразвуковой обработки измеряли с помощью цифрового термометра с дискретностью 0,01 °С. Продолжительность ультразвуковой обработки воды составляла 1 мин. Для каждого уровня мощности проводилось по три измерения.

2.6 Методы и оборудование для исследования особенностей формирования парогазовой оболочки и определения съема металла при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей

Исследования особенностей формирования парогазовой оболочки и закономерностей съема при ЭПО цилиндрических поверхностей проводились на экспериментальной установке ЭПО мощностью 3 кВт (рисунок 2.9) с рабочей ванной объемом 10 л. Установка оснащена оборудованием, которое обеспечивает стабильность технологических параметров в процессе обработки. В рабочей ванне установки предусмотрено смотровое окно, обеспечивающее возможность наблюдения за процессом обработки.

Для исследований особенностей съема при вертикальной ориентации в качестве образцов использовались калиброванные прутки из стали 12Х18Н9 диаметрами 2, 6 и 10 мм. Обработка образцов осуществлялась при температуре 80 °С. Длина погружаемой в электролит части образцов составляла 110 мм. Продолжительность обработки составляла 3 ч.



Рисунок 2.9 – Экспериментальная установка ЭПО

Обработанные образцы имели форму, близкую к конической. После обработки проводились измерения диаметров на различных участках по длине образцов, на основании которых рассчитывалась величина съема. Измерения исходных и конечных размеров образ-

цов проводились с помощью цифрового микрометра с ценой деления 0,001 мм.

Для выполнения экспериментальных исследований влияния параметров ЭПО на скорость съема металла разработана и изготовлена специальная оснастка (рисунок 2.10), позволяющая выполнять размерную обработку цилиндрических образцов с равномерным съемом материала. Оснастка состоит из ванны 3 глубиной 300 мм и объемом 20 л, штанги 5 и подвижной тяги 6 для регулировки длины обрабатываемой части образца. Тяга 6 оснащена шарниром 4 с устройством для зажима образца. Обрабатываемый образец 1 проводится через клапан 2 в боковой стенке ванны и зажимается в шарнире 4 на расстоянии 50 мм от дна ванны. Токопровод осуществляется через свободную часть образца, находящуюся вне ванны, с помощью скользящего контакта. Равномерность съема достигается за счет того, что в процессе обработки образец дискретно вручную поворачивается вокруг оси на угол 90° с интервалом, определяемым общей продолжительностью обработки.

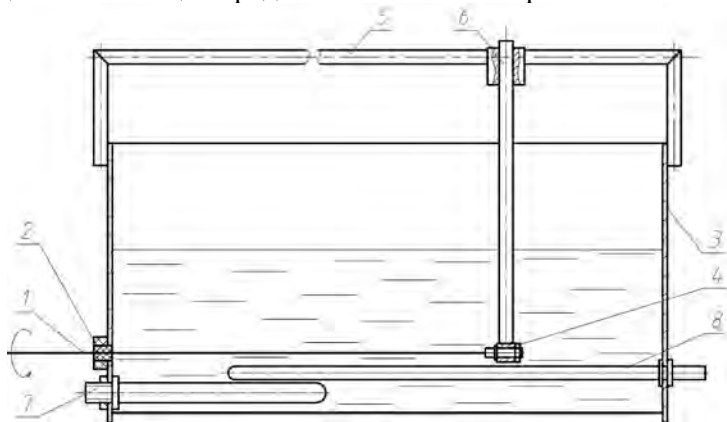


Рисунок 2.10 – Технологическая оснастка для ЭПО экспериментальных образцов

Стабилизация температуры электролита в процессе обработки образцов осуществляется с помощью микропроцессорного измерителя-регулятора МТ2, который управляет погружным ТЭНом 7 для нагрева электролита и магнитным клапаном встроенного в ванну теплообменника 8 для охлаждения электролита. Выравнивание

температуры по объему рабочей ванны осуществляется перемешиванием электролита вручную.

Изменение расстояния от образца до поверхности электролита (установка глубины погружения) осуществляется путем слива или долива электролита в ванну до необходимого уровня. Высота ванны позволяет устанавливать глубину погружения до 245 мм.

В качестве образцов для проведения исследований использовались калиброванные прутки из стали 12Х18Н9 диаметром 1,8 мм с длиной обрабатываемой части 100 мм. Поскольку ЭПО сопровождается постепенным снижением диаметра образцов, т.е. уменьшением радиуса кривизны, то это приводит к увеличению интенсивности съема [87, 114]. Поэтому при расчетах скорости съема введен показатель средней скорости съема, который при малой продолжительности обработки (до 10 мин) близок к истинному значению скорости съема.

Измерение исходных и конечных размеров образцов проводились с помощью цифрового микрометра с ценой деления 0,001 мм.

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЗАГОТОВКИ ДЛИННОМЕРНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ КОНЦЕНТРАТОРОВ-ИНСТРУМЕНТОВ

3.1 Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхности деформированного материала

3.1.1 Микромеханические исследования поверхностного слоя

Анализ распределения микротвердости в поперечном сечении цилиндрического образца из стали 12Х18Н9 после традиционного волочения с суммарной степенью деформации 66 % показал, что его поверхность упрочнена в большей степени, чем сердцевина (рисунок 3.1). На поверхности образца величина микротвердости составляет около 4100 МПа. В поверхностном слое толщиной около 70 мкм наблюдается плавное снижение микротвердости до 3400 МПа. Далее наблюдается незначительное увеличение микротвердости к центру образца. Среднее значение микротвёрдости в сердцевине составляет 3500 МПа.

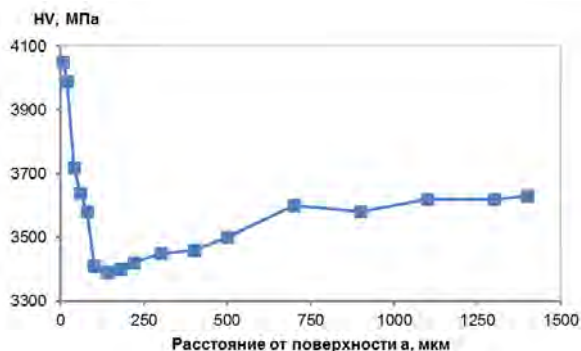
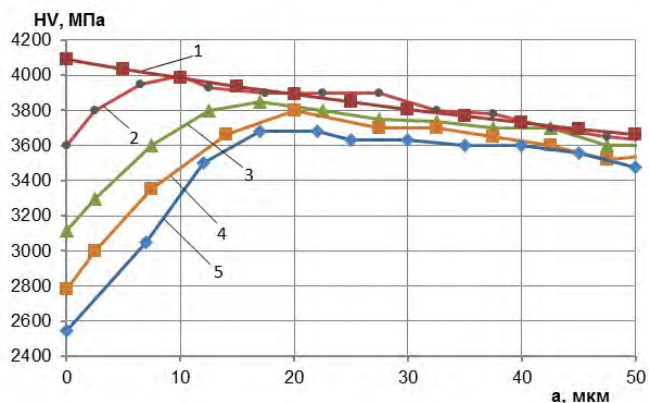


Рисунок 3.1 – Распределение микротвердости HV по сечению образца после волочения со степенью деформации 66 %

Повышенная микротвердость поверхности объясняется тем, что в процессе волочения периферийные слои в очаге деформации испытывают большее сопротивление формоизменению чем центральные слои из-за контактных сил трения и дополнительных сдвиговых деформаций, определяемых геометрией инструмента, поэтому и упрочняются они в большей степени [29].

В работе исследовано распределение микротвердости в поверхностном слое глубиной 50 мкм на образцах, полученных волочением с последующей ЭПО. Результаты измерения распределения микротвердости в исследуемых поверхностных слоях после ЭПО различной продолжительности представлены на рисунке 3.2. Полученные результаты показали, что ЭПО деформированного материала приводит к разупрочнению его поверхностного слоя. С повышением продолжительности ЭПО увеличивается величина разупрочнения и глубина разупрочненного слоя. После ЭПО продолжительностью 10 мин микротвердость поверхности составляет 2500 МПа, а глубина разупрочненного слоя – около 22 мкм.



1 – без ЭПО; 2 – ЭПО 1 мин; 3 – ЭПО 3 мин; 4 – ЭПО 5 мин; 5 – ЭПО 10 мин

Рисунок 3.2 – Распределение микротвердости HV в поверхностном слое после ЭПО

На рисунке 3.3 представлена зависимость, характеризующая изменение глубины разупрочненного слоя a_{Δ} от продолжительности ЭПО. Анализ зависимости показывает, что наиболее интенсивное разупрочнение происходит в первые 3–5 мин обработки. Дальней-

шая обработка не приводит к существенному изменению глубины разупрочненного слоя.

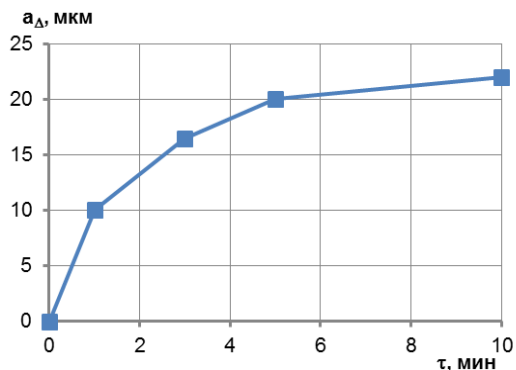
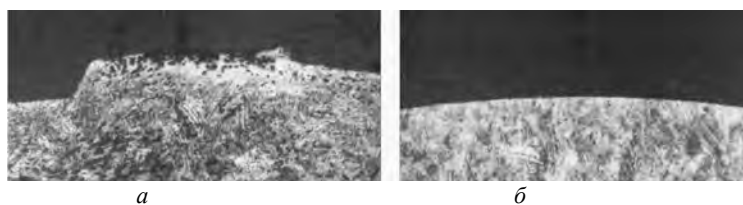


Рисунок 3.3 – Зависимость глубины разупрочненного слоя a_D от продолжительности ЭПО τ

Разупрочнение поверхности можно объяснить уменьшением количества карбидов вследствие их избирательного травления в процессе ЭПО. Так, в работе [90] проводили исследования морфологии поверхности образцов стали 08X18N10T после финишной обработки методами механического полирования и ЭПО, в результате которых установлено, что на поверхности после ЭПО количество дефектов в виде углублений и карбидных включений по сравнению с механически полированием меньше в 10 раз. Кроме того, уменьшение микротвердости связано с изменением размеров образцов в результате ЭПО. Поскольку ЭПО сопровождается удалением поверхностного слоя, то в результате обработки нижние слои, имеющие после волочения меньшую микротвердость (рисунок 3.2, кривая 1), оказываются на поверхности. Анализ участка кривой 1, представленной на рисунке 3.2, соответствующего поверхностной области, показывает, что при удалении слоя толщиной 2,5 мкм (ЭПО 1 мин) микротвердость уменьшится на 50 МПа, а при удалении слоя 25 мкм (ЭПО 10 мин) – на 200 МПа.

3.1.2 Микроструктурные, рентгеноструктурные и электронно-микроскопические исследования поверхностного слоя

На рисунке 3.4 представлены фотографии поверхности образца после волочения (исходный образец) и образца после волочения с последующей ЭПО продолжительностью 10 мин. На поверхности исходного образца присутствуют задиры, микротрещины и складки. ЭПО приводит к удалению дефектного слоя и сглаживанию поверхности [115, 116].



а – исх.; б – ЭПО 10 мин

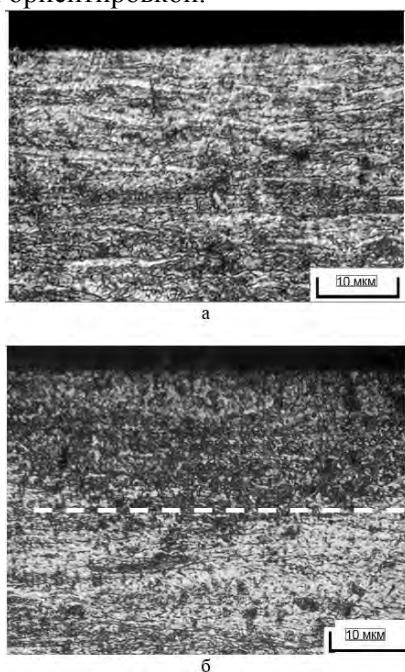
Рисунок 3.4 – Состояние поверхности образцов в поперечном сечении до и после ЭПО, $\times 200$

Микроструктурные исследования показывают, что разупрочнение поверхностного слоя в результате ЭПО сопровождается изменением его структуры. На рисунке 3.5 представлены фотографии поверхностного слоя деформированных образцов в продольном сечении. На образце после ЭПО продолжительностью 10 мин (рисунок 3.5б) толщина слоя с измененной структурой составляет 20–25 мкм. Из рисунка видно, что измененный слой характеризуется отсутствием текстуры деформации.

Сталь 12Х18Н9 является неустойчивым в структурном отношении сплавом. Неустойчивость структуры главным образом определяется фазовыми превращениями, происходящими при пластической деформации, в результате которой аустенит закаленного сплава превращается в мартенсит [117]. Формирование высокопрочного состояния происходит в сложных условиях, когда наряду с мартенситным превращением наблюдается наклеп образующегося мартенсита и в определенной степени наклеп аустенита. При этом структура деформированного аустенита наследуется образующимся мартенситом. Мартенситное превращение в процессе пластической

деформации протекает с образованием промежуточной фазы – ϵ -мартенсита, имеющего гексагональную плотноупакованную решетку; происходит оно бездиффузионным сдвиговым путем с большой скоростью при ограниченном росте кристаллов [118]. Наложение ультразвуковых колебаний при волочении таких сталей позволяет уменьшить фазовый наклёп за счет торможения мартенситного превращения и тем самым создаёт предпосылку для увеличения единичных обжатий [119].

Для исследования влияния ЭПО на изменение фазового состава поверхностного слоя проведены рентгеноструктурные исследования. На рисунке 3.6 представлены рентгенограммы сравнения образцов после ЭПО различной продолжительности в диапазоне углов $2\theta = 40-85^{\circ}$, позволяющие определить количественное содержание в поверхностном слое α -фазы (мартенсита) и γ -фазы (аустенита) с их преимущественной ориентировкой.



а – исх; б – ЭПО 10 мин

Рисунок 3.5 – Микроструктура поверхностного слоя образца из стали 12Х18Н9 со степенью обжатия 66 %

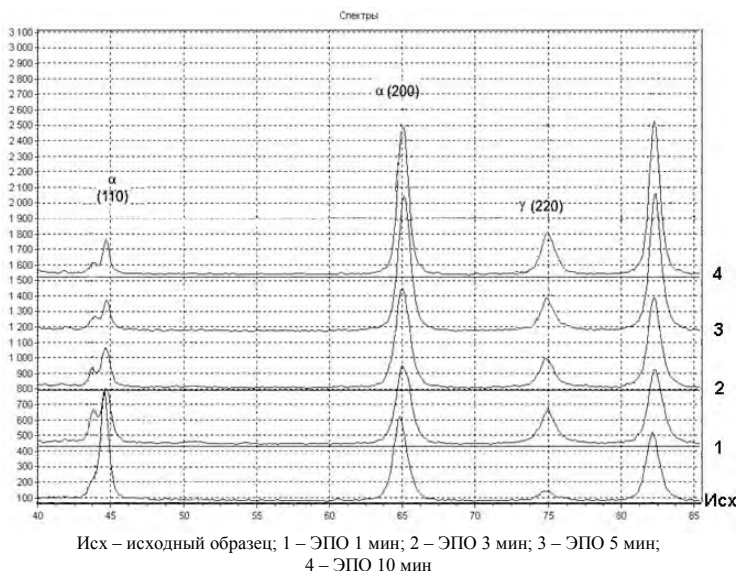


Рисунок 3.6 – Влияние продолжительности ЭПО на изменение фазового состава в поверхностном слое деформированного материала

Данные расшифровки фазового состава и их количественные соотношения приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Фазовый состав и преимущественная ориентировка фаз в зависимости от продолжительности ЭПО

№ обр	Обработка	α – фаза		γ – фаза	
		количе - ство, %	ориентировка	количе - ство, %	ориентировка
1	Исходный	88,7	110	11,3	–
2	ЭПО 1 мин	69,8	200 211	30,2	220
3	ЭПО 3 мин	67,8	211 200	32,2	220
4	ЭПО 5 мин	65,5	211 200	34,5	220
5	ЭПО 10 мин	57,4	211	42,6	220

Полученные результаты показывают, что ЭПО приводит к изменению фазового состава поверхностного слоя с увеличением количества γ-фазы и уменьшением количества α-фазы. После деформации со степенью обжатия 66 % содержание α-фазы в структуре материала составляет 88,7 %, γ-фазы – 11,3 %. После ЭПО

продолжительностью 10 мин количество α -фазы в поверхностном слое уменьшается до 57,4 % относительно исходного деформированного состояния, а количество γ -фазы увеличивается до 42,6 %. ЭПО приводит также к изменению преимущественной ориентировки α -фазы. α -фаза меняет ориентацию в плоскости (110) на ориентацию в плоскостях (200), (211) при продолжительности обработки от 1 до 5 мин и переориентируется в плоскости (211) при обработке в течение 10 мин. Ориентировка γ -фазы со временем обработки не меняется. Изменение фазового состава в результате ЭПО связано с преимущественным растворением мартенсита при обработке аустенитных сталей в электролите на основе сульфата аммония [87]. Динамика изменения фазового состава в поверхностном слое деформированного материала в зависимости от продолжительности ЭПО представлена на рисунке 3.7.

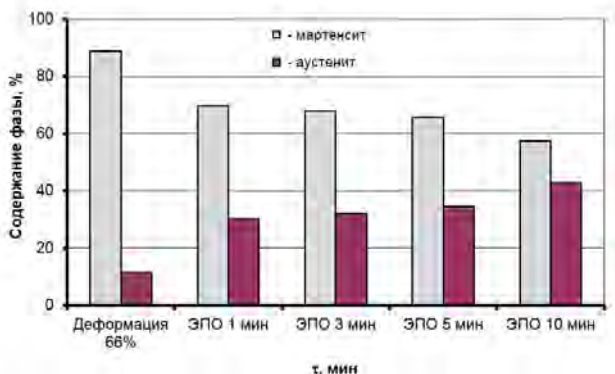


Рисунок 3.7 – Изменение фазового состава поверхностного слоя в результате ЭПО

Изменение фазового состава в поверхностном слое с увеличением содержания менее твердой аустенитной фазы также является причиной установленного выше (подраздел 3.1.1) снижения микротвердости поверхностного слоя в результате ЭПО.

Для исследования параметров тонкой структуры определялись рентгенографические профили сравнения линий (220) γ -фазы образцов по интегральному уширению (рисунок 3.8).

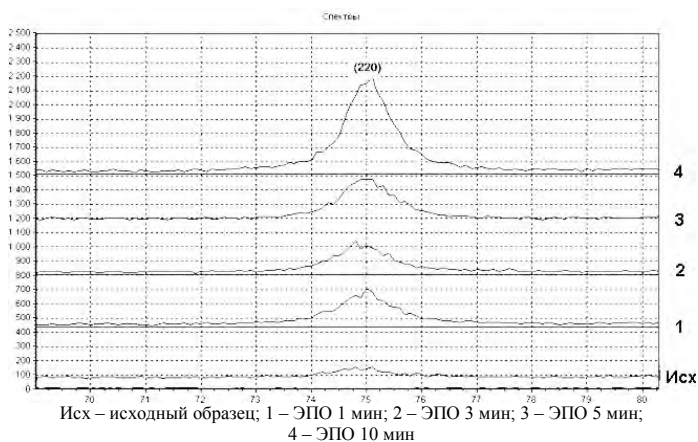


Рисунок 3.8 – Сравнение профиля линии (220) γ -фазы по интегральному уширению

В таблице 3.2 представлены результаты расчетов параметров тонкой структуры по интегральному уширению.

Таблица 3.2 – Параметры тонкой структуры

№ обр	Обработка	Размер обл. когер. ра-сеив. $D_{эфф}$, Å	Интегральная ширина линии ФФУ, β , °	Относит. средне-квадратич. микроде-форм., $\times 10^{-4}$	Плотность дислока-ций ρ , $1/\text{см}^2 \times 10^{10}$	Модель распре-деления, Pr, C, E	Парам крист. реш., Å
1	Деформация 66 %	$110 \pm 9,95$	1,0208	15,43	1,52467	Степенное	3,5882
2	ЭПО 1 мин	$79 \pm 7,28$	0,9169	15,1	1,45904	Степенное	3,5841
3	ЭПО 3 мин	$85 \pm 9,96$	0,8827	15,04	1,44899	Степенное	3,5795
4	ЭПО 5 мин	$111 \pm 7,28$	0,7555	13,92	1,23935	Экспоненц	3,5918
5	ЭПО 10 мин	$120 \pm 9,96$	0,6822	11,04	0,773763	Экспоненц	3,5813

На рисунке 3.9 представлены электронно-микроскопические фотографии поверхностных слоев образцов после ЭПО. Структура образца после деформации волокнистая с преобладанием текстуры направления [110] с большим содержанием α -фазы (рисунок 3.9а) и высокой плотностью дислокаций Д. Средний размер зерен-волокон составляет 15 мкм, зерна фрагментированы, размер фрагментов – 1 мкм, фрагменты в свою очередь разбиты на ячейки (области когерентного рассеивания) величиной 110 Å. Стенки фрагментов и ячеек сформированы винтовыми и краевыми дислокациями. ЭПО про-

должительностью 1–3 мин в целом не изменяет дислокационную картину, (рисунок 3.9 б). Размер области когерентного рассеивания уменьшается до 80 Å, что связано с уменьшением содержания α -фазы и увеличением содержания γ -фазы (по данным рентгеноструктурного анализа). Наблюдается очищение границ фрагментов, связанное с аннигиляцией и перемещением дислокаций от границ внутрь фрагментов.

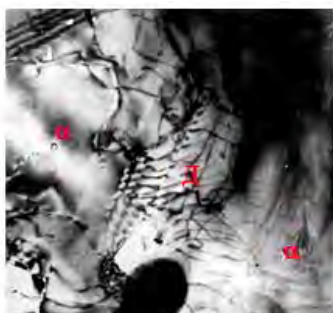
В результате ЭПО продолжительностью 5 минут происходит дислокационная перестройка с уменьшением плотности дислокаций до $1,23 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рисунок 3.9в, г). Дислокационные ансамбли Д сосредотачиваются на границах ячеек γ -фазы, уходя от границ фрагментов, образуя клубковые структуры внутри фрагментов. Формируется переориентированная структура в направлении [220] с возросшим количеством γ -фазы.

При ЭПО продолжительностью 10 мин высокоплотная пограничная дислокационная структура трансформируется в менее плотную структуру с единичными или изогнутыми дислокациями Д (рисунок 3.9д) преимущественно краевой ориентации, размещающимися по границам ячеек.

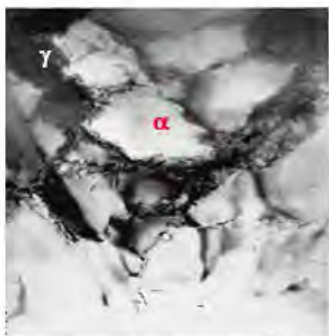
Размер области когерентного рассеивания, полученной при ЭПО γ -фазы, увеличивается за 5 мин обработки до размера области когерентного рассеивания α -фазы и составляет 111 Å, при 10 мин обработки увеличение размера области когерентного рассеивания γ -фазы достигает 120 Å. Увеличение области когерентного рассеивания в результате ЭПО свидетельствует о снижении дефектности структуры.

Распределение относительной среднеквадратичной микродеформации в зависимости от расстояния в кристаллической решетке в деформированном состоянии описывается степенной моделью, характеризующейся отсутствием хаоса и скоплением дислокаций в стенках. ЭПО продолжительностью до 3 мин практически не влияет на изменение относительной среднеквадратичной микродеформации, которая составляет в среднем $15,2 \cdot 10^{-4}$. Дальнейшая обработка приводит к уменьшению величины относительной среднеквадратичной микродеформации, значение которой в результате ЭПО продолжительностью 10 мин составляет $11,04 \cdot 10^{-4}$. Это приводит к перегруппировке дислокационных ансамблей с их хаотическим

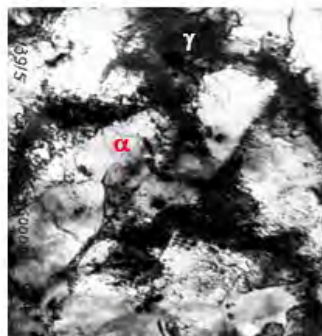
распределением, что свидетельствует о разупрочнении обработанного поверхностного слоя [115, 116, 120].



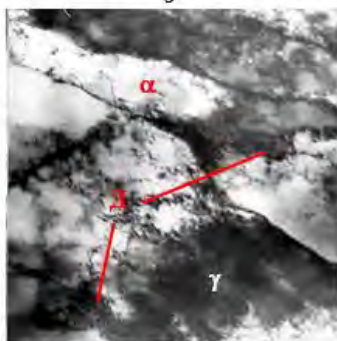
а



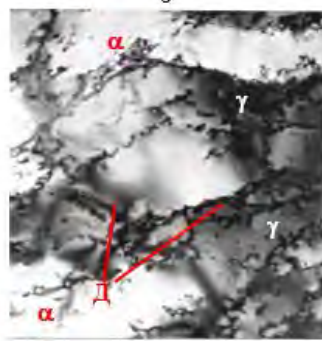
б



в



г



д

а) исх; б) ЭПО 1 мин; в) ЭПО 3 мин; г) ЭПО 5 мин; д) ЭПО 10 мин

Рисунок 3.9 – Электронно-микроскопические фотографии поверхностных слоев образцов после ЭПО, х60000

По сравнению с исходным состоянием в результате ЭПО продолжительностью 10 мин происходит уменьшение плотности дислокаций в два раза: значение плотности дислокации изменяется от $1,52 \cdot 10^{10}$ до $0,77 \cdot 10^{10}$ см^{-2} . На рисунке 3.10 представлена зависимость, характеризующая изменение плотности дислокаций ρ в исследуемом поверхностном слое от продолжительности ЭПО τ .

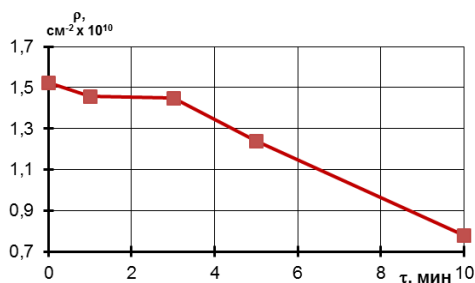


Рисунок 3.10 – Зависимость плотности дислокаций ρ от продолжительности ЭПО τ

Представленная зависимость имеет падающий характер. Очевидно, что снижение плотности дислокаций связано с постепенным удалением в процессе ЭПО слоя с максимальной плотностью дислокаций. Зависимость величины относительной среднеквадратичной микродеформации (ОСМД) в поверхностном слое от продолжительности ЭПО имеет аналогичный характер, т.е. коррелирует с зависимостью плотности дислокаций от продолжительности ЭПО (рисунок 3.11) [121–124].

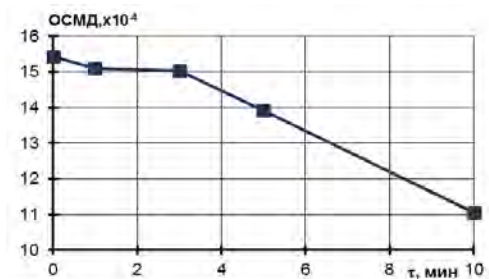


Рисунок 3.11 – Зависимость величины относительной среднеквадратичной микродеформации от продолжительности ЭПО

3.2 Влияние продолжительности электролитно-плазменной обработки между проходами волочения на распределение остаточных напряжений в материале

Результаты исследований влияния ЭПО на структуру и свойства поверхностного слоя деформированного материала позволили предположить, что применение ЭПО между проходами волочения при получении заготовок для концентраторов-инструментов может обеспечить повышение усталостной прочности за счет снижения остаточных напряжений в поверхностном слое, а также повышение акустических характеристик материала за счет снижения плотности микро- и макродефектов [125].

Снижение остаточных напряжений и повышение акустических характеристик может быть обусловлено следующими явлениями, которые наблюдаются в деформированном материале после ЭПО:

- удаление между проходами волочения слоя с повышенной плотностью дислокаций, инородными включениями, продуктами износа инструмента;
- сглаживание или удаление продольных складок, которые впоследствии являются центрами усталостного разрушения;
- снижение коэффициента трения, обеспечивающее снижение напряжений в зоне контактного трения;
- разупрочнение поверхностного слоя.

Исследование влияния промежуточной ЭПО между проходами волочения на распределение остаточных напряжений по сечению заготовки проводилось методом замера прогибов. В таблице 3.3 приведены результаты измерения величины прогиба образцов после сошлифовывания слоёв по сечению образца, полученного традиционным волочением.

Таблица 3.3 – Результаты измерения величины прогиба

№ обр.	Отклонение точки А, мм	Отклонение точки С, мм	Величина прогиба f_s , мм
1	0	0	0
2	0,11	0,13	0,12
3	0,36	0,36	0,36
4	0,57	0,63	0,60
5	0,75	0,85	0,80

Продолжение таблицы 3.3

6	1,28	1,42	1,35
7	1,69	1,77	1,73
8	1,84	1,74	1,79
9	1,67	1,75	1,71
10	1,20	1,18	1,19

На основании полученных экспериментальных данных по формулам (2.2–2.7) выполнены расчеты остаточных напряжений. Расчеты выполнялись в программе Microsoft Excel. Промежуточные и конечные результаты расчетов приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Расчет величины остаточных напряжений

i	Δ_i , мм	a_i , мм	$f(a_i)$, мм	$\frac{df}{da}(a_i)$	$2 \int_0^{a_i} f(\xi) d\xi$ мм ²	$h - a_i$ мм	$(h - a_i)^2 \frac{df}{da}(a_i)$ мм ²	$-4(h - a_i)f(a_i)$ мм ²	$\sigma_{r(a_i)}$ МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	3,103	0,0000	1,80	10,05	0,00	1155,9
2	0,04	0,04	0,12	2,897	0,0048	1,76	8,98	-0,84	935,4
3	0,09	0,13	0,36	3,095	0,0480	1,67	8,63	-2,40	721,6
4	0,07	0,2	0,6	2,802	0,1152	1,60	7,17	-3,84	396,6
5	0,11	0,31	0,8	3,141	0,2692	1,49	6,97	-4,77	284,4
6	0,12	0,43	1,35	3,637	0,5272	1,37	6,83	-7,40	-5,1
7	0,16	0,59	1,73	1,283	1,0200	1,21	1,88	-8,37	-629,6
8	0,1	0,69	1,79	-0,032	1,3720	1,11	-0,04	-7,95	-760,6
9	0,11	0,8	1,71	-3,070	1,7570	1,00	-3,07	-6,84	-937,5
10	0,1	0,9	1,19	-7,330	2,0470	0,90	-5,94	-4,28	-939,9

В результате выполнения расчетов определены значения остаточных напряжений, действующих в кольцевых сечениях прутка. На основании полученных данных построена зависимость, характеризующая распределение остаточных напряжений по сечению (рисунок 3.12). В периферийных слоях прутка толщиной около 0,4 мм действуют неблагоприятные растягивающие остаточные напряжения с максимальным значением на поверхности –1080 МПа. В центральных слоях действуют сжимающие остаточные напряжения с максимальным значением в центре – 940 МПа.

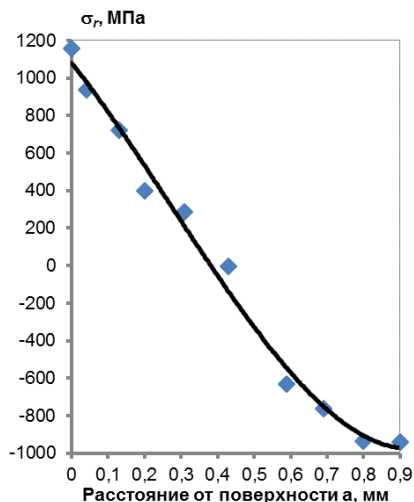


Рисунок 3.12 – Распределение остаточных напряжений σ_r в прутке после волочения без ЭПО

Расчет остаточных напряжений σ_r для образцов, полученных волочением с промежуточной ЭПО продолжительностью 1, 3, 5 и 10 мин, проводился в аналогичной последовательности. На основании аппроксимации полученных данных построены зависимости, характеризующие распределение остаточных напряжений в поверхностных слоях образцов (рисунок 3.13). Анализ полученных данных показывает, что в результате применения промежуточной ЭПО между проходами волочения в поверхностных слоях глубиной до 0,2–0,25 мм (образцы с 1 по 4) происходит снижение величины остаточных напряжений относительно значений остаточных напряжений в образцах, полученных волочением без ЭПО. В центральных слоях образцов значимых изменений величины остаточных напряжений не происходит. Из представленных данных следует, что чем больше продолжительность ЭПО, тем больше величина уменьшения остаточных напряжений. Однако наиболее существенный эффект наблюдается при продолжительности промежуточной ЭПО до 3 мин.

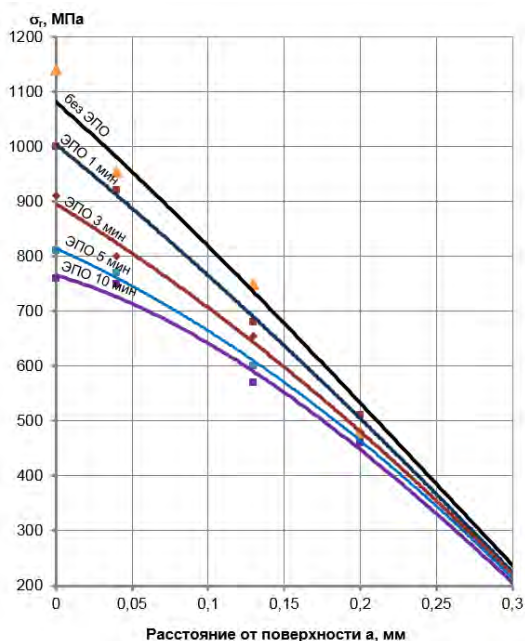


Рисунок 3.13 – Распределение остаточных напряжений σ_r в поверхностном слое образцов, полученных волочением с различной продолжительностью промежуточной ЭПО

Причиной снижения величины остаточных напряжений в результате применения ЭПО между проходами волочения является изменение характеристик поверхностного слоя, которое выражается в снижении микротвердости, а также в удалении карбидов [89, 90] и очистке поверхности от межоперационных загрязнений и продуктов износа инструмента, уменьшением коэффициента трения [91, 92, 126]. Изменение характеристик поверхности обеспечивает снижение сопротивления поверхностных слоев формоизменению из-за уменьшения контактных сил трения и снижения величины сдвиговых деформаций, что в свою очередь приводит к уменьшению остаточных напряжений.

Проведенные исследования показывают, что применение ЭПО между проходами волочения обеспечивает снижение величины растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое упрочняемого волочением материала [127, 128]. В проведенном в главе 1

обзоре отмечено, что растягивающие остаточные напряжения оказывают отрицательное влияние на прочностные характеристики материала. Поэтому применение промежуточной электролитно-плазменной обработки между проходами волочения при получении заготовок концентраторов-инструментов становится целесообразным не только для повышения акустических характеристик материала, а также для повышения его прочностных характеристик, в частности усталостной прочности, за счет снижения величины растягивающих напряжений.

3.3 Исследование процесса волочения заготовки с промежуточной электролитно-плазменной обработкой

В результате ЭПО, применяемой между проходами волочения, происходит сьем металла с поверхности заготовки и уменьшение её диаметра. Уменьшение диаметра заготовки приводит к снижению единичных и суммарных обжатий и, соответственно, к снижению степени деформационного упрочнения. Чем больше продолжительность промежуточной ЭПО, тем меньше величина обжатий и степень упрочнения при волочении. Снижение прочностных характеристик заготовки вследствие уменьшения степени деформационного упрочнения материала приводит, соответственно, к снижению надежности получаемых концентраторов-инструментов. Поэтому при изготовлении заготовки концентратора-инструмента следует обеспечить наиболее приемлемое сочетание предела прочности, определяемого степенью обжатия при волочении, и низких растягивающих остаточных напряжений, определяемых продолжительностью промежуточной ЭПО между проходами волочения.

Из-за уменьшения диаметра заготовки при ЭПО на промежуточных проходах волочения становится невозможным определить степень обжатия по значениям исходного и конечного диаметра. В таком случае истинные значения суммарных степеней обжатия $\delta_{\text{сум}}$ определяются по формуле:

$$\delta_{\text{сум}} = 1 - \frac{1}{\mu_{\text{сум}}}, \quad (3.1)$$

где $\mu_{\text{сум}}$ – суммарная вытяжка, которая определяется по формуле:

$$\mu_{\text{сум}} = \mu_1 \mu_2 \mu_3 \dots \mu_n, \quad (3.2)$$

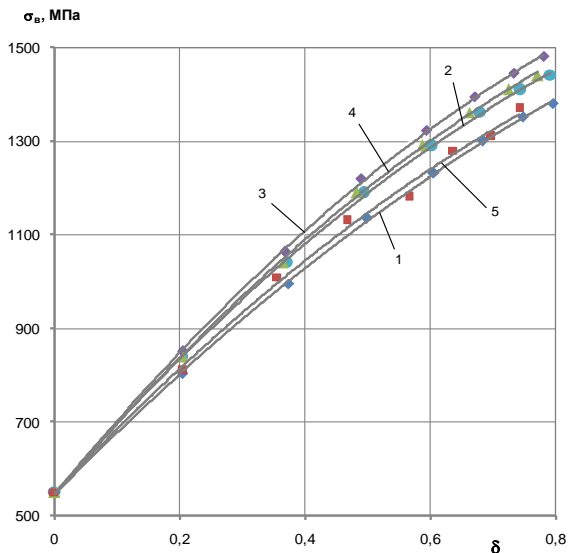
где n – количество проходов при волочении.

На основании маршрута волочения, приведенного в таблице 3.5, по формулам (3.1) и (3.2) выполнены расчеты суммарных вытяжек $\mu_{\text{сум}}$ и суммарных обжатий $\delta_{\text{сум}}$ при волочении с ЭПО различной продолжительности. Результаты расчетов приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Суммарные вытяжки и обжатия при волочении с ЭПО

Группа образцов	Продолжительность промежуточной ЭПО, мин	Уменьшение диаметра, мм	Суммарная вытяжка $\mu_{\text{сум}}$	Суммарное обжатие $\delta_{\text{сум}}$
1	0	0	4,89	0,795
2	1	0,005	4,77	0,790
3	3	0,015	4,53	0,779
4	5	0,025	4,30	0,767
5	10	0,050	3,78	0,735

Для оценки влияния промежуточной ЭПО на предел прочности с учетом уменьшения суммарных обжатий в результате съема металла исследовались экспериментальные кривые деформационного упрочнения (рисунок 3.14). Кривые построены на основе аппроксимации значений предела прочности, измеренных при испытаниях на разрыв образцов, полученных волочением с промежуточной ЭПО различной продолжительности [129]. Испытания на разрыв проводились на универсальной испытательной машине «Instron 1195».



1 – без ЭПО ($\delta_{\text{сум}} = 0,795$); 2 – ЭПО 1 мин ($\delta_{\text{сум}} = 0,795$); 3 – ЭПО 3 мин ($\delta_{\text{сум}} = 0,779$);
4 – ЭПО 5 мин ($\delta_{\text{сум}} = 0,767$); 5 – ЭПО 10 мин ($\delta_{\text{сум}} = 0,735$)

Рисунок 3.14 – Экспериментальные кривые деформационного упрочнения стали 12X18H9 при волочении с промежуточной ЭПО

Из рисунка видно, что кривые упрочнения 2, 3 и 4, соответствующие режимам волочения с промежуточной ЭПО продолжительностью от 1 до 5 мин, находятся выше кривой 1, соответствующей режиму волочения без ЭПО. Таким образом, несмотря на снижение суммарной степени обжатия, применение промежуточной ЭПО между проходами волочения приводит к повышению предела прочности материала. На рисунке 3.15 (кривая 1) приведена зависимость предела прочности полученных образцов от продолжительности промежуточной ЭПО, из которой следует, что применение промежуточной ЭПО продолжительностью до 3 мин способствует повышению предела прочности материала. Предел прочности образца, полученного волочением с промежуточной ЭПО продолжительностью 3 мин, повышается на 100 МПа относительно предела прочности образца, полученного волочением без ЭПО.

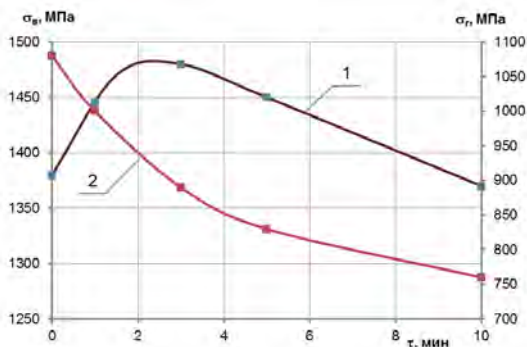


Рисунок 3.15 – Зависимость предела прочности (1) и остаточных напряжений (2) в поверхностном слое от продолжительности промежуточной ЭПО

Повышение предела прочности при снижении суммарного обжатия можно объяснить уменьшением плотности дефектов в структуре материала вследствие применения ЭПО между проходами волочения, а также уменьшением величины неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в периферийных слоях образцов.

Дальнейшее увеличение продолжительности ЭПО приводит к постепенному снижению предела прочности материала, что вызвано разупрочнением поверхности при ЭПО и недостаточной степени деформационного упрочнения из-за существенного снижения суммарной степени обжатия в результате удаления металла в процессе промежуточной ЭПО.

На рисунке 3.15 (кривая 2) представлена зависимость величины остаточных напряжений в поверхностном слое образцов от продолжительности промежуточной ЭПО. Из представленной зависимости следует, что наиболее интенсивное снижение остаточных напряжений в материале происходит в результате промежуточной ЭПО продолжительностью до 3 мин. ЭПО продолжительностью более 3 мин характеризуется низкой интенсивностью снижения остаточных напряжений.

Из анализа кривых, представленных на рисунке 3.15 следует, что для обеспечения высокой прочности и низких остаточных напряжений наиболее приемлемым является режим волочения, включающий промежуточную ЭПО между проходами продолжительностью 3 мин, что обеспечивает повышение предела прочности материала с

1380 МПа до 1480 МПа и снижение величины растягивающих остаточных напряжений на поверхности с 1080 МПа до 880 МПа.

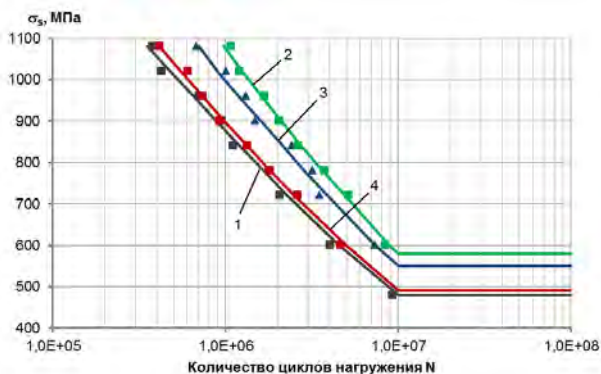
3.4 Влияние электролитно-плазменной обработки между проходами волочения на усталостную прочность и акустические характеристики заготовки

Исследование влияния ЭПО между проходами волочения на эксплуатационные характеристики заготовки проводилось путём сравнения усталостной прочности и акустических характеристик образцов, полученных традиционным волочением и волочением с промежуточной ЭПО различной продолжительности.

3.4.1 Влияние электролитно-плазменной обработки между проходами волочения на усталостную прочность заготовки

Испытания на усталостную прочность начинались при среднем напряжении в металле, рассчитанном по формуле (2.9), равным 1082 МПа, что соответствовало величине 72 % от предела прочности при статическом нагружении. Среднее время до разрушения образца после волочения без ЭПО составило 16 с, что соответствует числу циклов $N = 4,0 \cdot 10^5$. Далее величина нагружения постепенно уменьшалась до тех пор, пока не был достигнут уровень, при котором образец не разрушался после числа циклов равного базе испытаний ($N = 1 \cdot 10^7$).

На основании полученных экспериментальных данных построены кривые усталости в логарифмической системе координат для образцов после традиционного волочения без промежуточной ЭПО и после волочения с промежуточной ЭПО продолжительностью 3, 5 и 10 мин (рисунок 3.16).



1 – без ЭПО; 2 – ЭПО 3 мин; 3 – ЭПО 5 мин; 4 – ЭПО 10 мин

Рисунок 3.16 – Кривые усталости образцов после волочения и после волочения с ЭПО

Результаты испытаний усталостной прочности образцов показывают, что применение промежуточной ЭПО приводит к повышению усталостной прочности материала. В результате применения промежуточной ЭПО продолжительностью 3 мин предел выносливости материала повышается на 21 % (с 480 МПа до 580 МПа), продолжительностью 5 мин – на 14,5 %.

Повышение предела выносливости в случае волочения прутков с применением промежуточной ЭПО обусловлено уменьшением количества дефектов в структуре материала и повышением качества поверхностного слоя, что приводит к снижению количества концентраторов напряжений, являющихся центрами образования усталостных трещин. Повышение предела выносливости связано также со снижением величины растягивающих остаточных напряжений в периферийных слоях.

Промежуточная ЭПО продолжительностью 10 мин практически не оказывает влияние на изменение предела выносливости материала, что можно объяснить пониженной прочностью материала по сравнению с образцами, полученными волочением с ЭПО продолжительностью 3 и 5 мин.

3.4.2 Влияние электролитно-плазменной обработки между проходами волочения на акустические характеристики заготовки

При прохождении ультразвука через любую среду наблюдается уменьшение амплитуды и интенсивности ультразвукового сигнала, которое называется затуханием. Затухание ультразвука вызывается поглощением, отражением и рассеиванием волн. Чем выше неоднородность среды и больше дефектов в структуре, тем выше затухание ультразвука [28]. Влияние промежуточной ЭПО при волочении на затухание ультразвука оценивалось калориметрическим методом по изменению интенсивности передаваемых ультразвуковых колебаний (по изменению температуры).

На рисунке 3.17 представлены диаграммы, характеризующие влияние промежуточной ЭПО между проходами волочения на изменение температуры при различных режимах базовой интенсивности ультразвукового генератора: (раздел 2.5). Измерения проводились для образцов, полученных волочением без ЭПО, а также волочением с промежуточной ЭПО продолжительностью 3 мин.

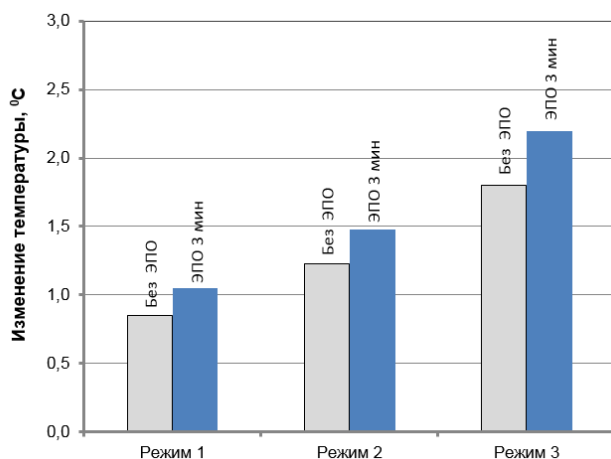


Рисунок 3.17 – Изменение температуры обработанной ультразвуком воды при использовании образцов, полученных волочением и волочением с промежуточной ЭПО продолжительностью 3 мин

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение промежуточной ЭПО между проходами волочения обеспечивает повышение акустических характеристик материала. Количество тепла, передаваемого в жидкость, и, соответственно, интенсивность передаваемого ультразвука в образцах, полученных с применением ЭПО продолжительностью 3 мин, увеличивается на 22–24 %.

Применение ЭПО между проходами волочения привело к формированию более однородной по сравнению с обычным волочением структуры, имеющей низкую плотность дислокаций, низкое количество дефектов и инородных включений, являющихся концентраторами напряжений. Это позволило повысить акустические свойства материала заготовки для изготовления концентраторов-инструментов за счет снижения поглощения, отражения и рассеяния ультразвуковых волн.

ГЛАВА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЛИННОМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

4.1 Влияние условий формирования парогазовой оболочки на характер изменения и величину съема металла

Необходимым условием для протекания процесса ЭПО является существование сплошной парогазовой оболочки вокруг обрабатываемого изделия (анода). Образование парогазовой оболочки происходит в результате вскипания прианодного слоя электролита в электрическом поле при условии обеспечения достаточного выделения энергии. Вольт-амперная и вольт-температурная характеристики процесса ЭПО в значительной степени определяются толщиной парогазовой оболочки [130–132]. Как следствие, толщина парогазовой оболочки и ее форма существенно влияют на интенсивность протекающих на обрабатываемой поверхности физико-химических процессов, производительность обработки (съем металла) и качество поверхности обрабатываемого изделия.

Согласно исследованиям, проведенным в работах [87, 114], при обработке изделий сложного профиля, степень кривизны поверхности и её характер (выпуклость или вогнутость) оказывают значительное влияние на особенности формирования парогазовой оболочки, её толщину и стабильность, а также интенсивность протекания процесса ЭПО. Отмечено, что на выпуклых поверхностях толщина парогазовой оболочки меньше, чем на вогнутых. Причем чем меньше радиус кривизны поверхности и тоньше парогазовая оболочка, тем выше интенсивность обработки. Этим объясняется акцентированное сглаживание острых кромок и удаление заусенцев при ЭПО.

Цилиндрическая поверхность является частным случаем сложного профиля и представляет собой выпуклую криволинейную поверхность с постоянным радиусом кривизны. Такая геометрия обеспечивает одинаковые условия формирования парогазовой оболочки вокруг всей цилиндрической поверхности. Однако, в работах

[91, 92] отмечено, что ориентация заготовок в электролите также оказывает влияние на формирование парогазовой оболочки и, соответственно, интенсивность обработки.

С целью выявления характера влияния ориентации заготовки на особенности формирования парогазовой оболочки проведены исследования, включающие анализ изменения размеров и формы цилиндрических заготовок при их вертикальной и горизонтальной ориентации в электролите, а также визуальную оценку характера формирования потоков электролита вокруг обрабатываемой цилиндрической поверхности.

На рисунке 4.1 представлены зависимости, характеризующие изменение съема металла в вертикальном направлении по мере удаления от поверхности электролита [133, 134].

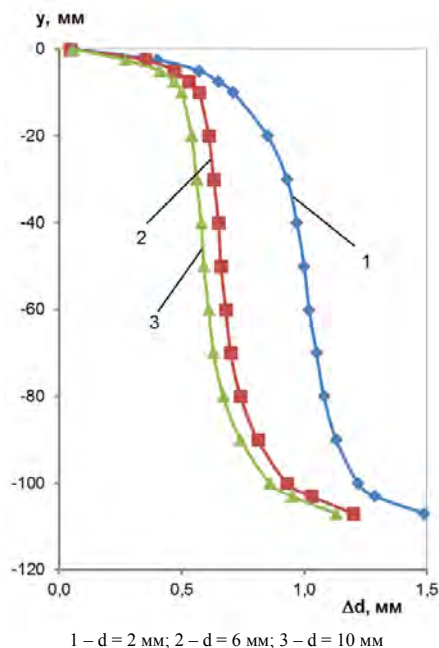


Рисунок 4.1 – Распределение съема металла при вертикальной ориентации цилиндрических образцов различного диаметра

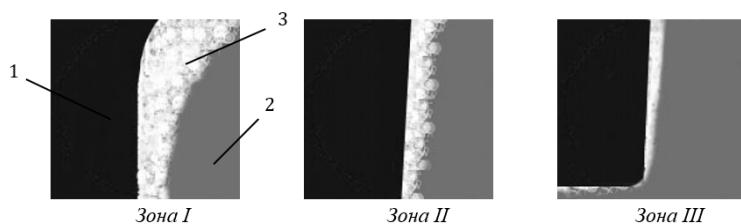
С увеличением расстояния от поверхности электролита повышается интенсивность съема металла. При этом очевидно, что представленные кривые имеют три характерные зоны:

I – Переходная зона – от поверхности электролита до зоны устойчивой парогазовой оболочки II. Из рисунка 4.1 видно, что с увеличением диаметра заготовки протяженность переходной зоны уменьшается.

II – Зона устойчивой парогазовой оболочки – вокруг вертикально расположенной цилиндрической поверхности.

III – Зона интенсивного съема – от зоны устойчивой парогазовой оболочки до плоской торцевой поверхности образца.

На рисунке 4.2 представлены схемы характерных зон формирования парогазовой оболочки при обработке цилиндрической вертикально расположенной заготовки, объясняющие неравномерность съема металла.



1 – образец (анод), 2 – электролит (катод), 3 – парогазовая оболочка

Рисунок 4.2 – Схемы характерных зон формирования парогазовой оболочки при обработке цилиндрических вертикально ориентированных образцов

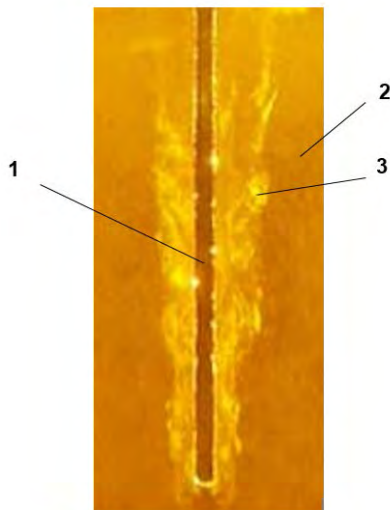
Переходная зона I характеризуется пониженным съемом по сравнению с зоной II, что связано со значительным увеличением толщины парогазовой оболочки за счет накопленного объема поднимающихся вдоль цилиндрической поверхности пузырей пара и газа и резким снижением гидростатического давления при выходе пузырей на поверхность.

Изменение величины съема по глубине в зоне II связано с изменением толщины парогазовой оболочки в вертикальном направлении, обусловленным рядом факторов:

1. Перепадом гидростатического давления электролита, действующего на парогазовую оболочку в вертикальном направлении. Электролит прижимает парогазовую оболочку к поверхности об-

разца с давлением, пропорциональным глубине. Поэтому с увеличением глубины толщина парогазовой оболочки уменьшается, а интенсивность ЭПО и, соответственно, съем увеличиваются.

2. Образованием и ростом пузырьков пара и газа, а также их объединением и перемешиванием (рисунок 4.3), что приводит к снижению давления на парогазовую оболочку при их движении к поверхности электролита.



1 – образец (анод); 2 – электролит (катод); 3 – потоки электролита

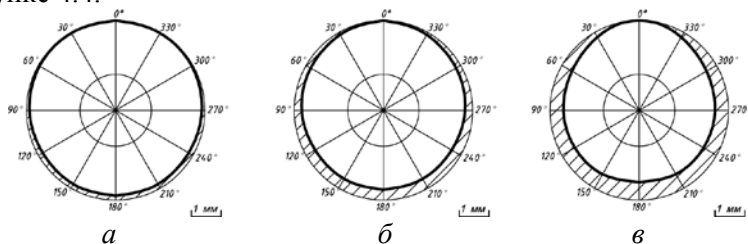
Рисунок 4.3 – Формирование потоков электролита вдоль поверхности цилиндрического образца при вертикальной ориентации

Формирование зоны интенсивного съема III связано с одновременным удалением металла с цилиндрической и торцевой поверхностями. При этом радиус сопряжения плоской торцевой поверхности и цилиндрической минимален, что обеспечивает высокую интенсивность съема.

Для исследований особенностей съема при горизонтальной ориентации использовались образцы из калиброванного прутка стали 12X18H9 диаметром 6 мм и длиной 50 мм. На торцах образцов зашлифовались центровые отверстия с целью позиционирования образца при последующем измерении полученного профиля. Глубина

погружения в электролит при обработке составляла 50 мм. Продолжительность обработки составляла 1, 2 и 3 ч.

Измерение профиля полученных образцов проводилось с помощью индикаторной головки с ценой деления 0,01 мм. Для центрирования образцов, а также для их поворота на заданный угол относительно продольной оси использовались зажимные приспособления токарного станка. Измерение профилей проводилось через каждые 30° . Измеренные профили горизонтально обработанных образцов после ЭПО продолжительностью 1, 2 и 3 ч представлены на рисунке 4.4.

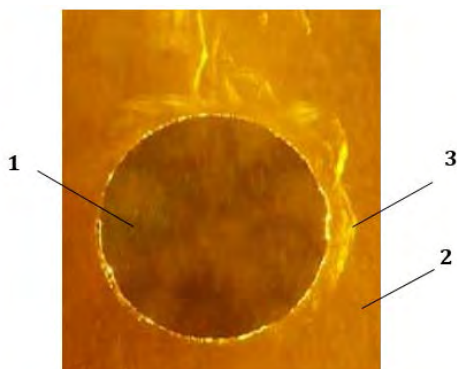


а – 1 ч; б – 2 ч; в – 3 ч

Рисунок 4.4 – Изменение профиля цилиндрического образца в процессе ЭПО при горизонтальной ориентации

Анализ полученных профилей позволяет сделать вывод о том, что максимальный сьем и, соответственно, минимальная толщина парогазовой оболочки достигаются в нижней зоне образца. Съем металла с верхней зоны образца практически отсутствует (ничтожно мал по сравнению со сьемом в нижней зоне образца). Причиной этому, как и в случае с вертикальной ориентацией, является увеличение толщины парогазовой оболочки из-за поднимающихся пузырей пара и газа, а также перепад давления электролита при их выходе на поверхность.

Отрываясь от нижней поверхности, пузырьки пара и газа обтекают заготовку по образующей и устремляются к поверхности электролита. Пузырьки, образуемые на верхней части образца, суммируются с пузырьками,двигающимися вдоль криволинейной поверхности и, поднимаясь, образуют на верхней части вспененный слой большой толщины, затрудняющий обработку. Это видно на фотографии, представленной на рисунке 4.5 [133, 134].



1 – заготовка (анод); 2 – электролит (катод); 3 – потоки электролита

Рисунок 4.5 – Формирование потоков электролита на цилиндрической поверхности обрабатываемого образца при горизонтальной ориентации

Проведенные исследования особенностей формирования парогазовой оболочки и съема металла при ЭПО цилиндрических поверхностей позволили установить, что в случаях как вертикальной, так и горизонтальной ориентации заготовки происходит неравномерный съем металла. В нижней зоне образца съем металла – максимальный, а в верхней зоне – минимальный.

Неравномерность съема при горизонтальной ориентации может быть компенсирована за счет придания образцу в процессе обработки вращения вокруг продольной оси. При этом частота вращения может быть незначительной (например, до 30 мин^{-1}) [47], поскольку скорость съема металла при ЭПО составляет $2,75\text{--}4 \text{ мкм/мин}$ на сторону [87].

4.2 Влияние параметров электролитно-плазменной обработки и геометрии поверхностей на скорость съема металла

Как было отмечено в разделе 1.2, основными технологическими параметрами процесса ЭПО являются концентрация электролита, температура электролита, рабочее напряжение и глубина погружения. Все указанные параметры оказывают влияние на толщину парогазовой оболочки и интенсивность съема металла. Поэтому выполнены экспериментальные исследования для количественной

оценки интенсивности съема – влияния на скорость съема радиуса кривизны длинномерных поверхностей горизонтальноориентированных образцов малого диаметра, а также для определения диапазона допустимых технологических параметров (за исключением концентрации электролита). Исследования проводились на образцах из стали 12X18H9 диаметром 1,8 мм.

4.2.1 Влияние глубины погружения заготовки в электролит на скорость съема

Как уже было отмечено ранее в разделе 4.1, на величину съема оказывает влияние глубина погружения образца в электролит, что связано с изменением толщины парогазовой оболочки в результате перепада гидростатического давления электролита, действующего на неё.

Для исследования влияния глубины погружения на скорость съема проводилась обработка образцов на различной глубине (от 5 до 245 мм). Обработка осуществлялась при температуре электролита 80 °С и рабочем напряжении 300 В. Продолжительность обработки составляла 10 мин. По измеренным значениям диаметров образцов после обработки рассчитывалась средняя скорость съема. На основании полученных данных построена зависимость, характеризующая изменение средней скорости съема от глубины погружения (рисунок 4.6).

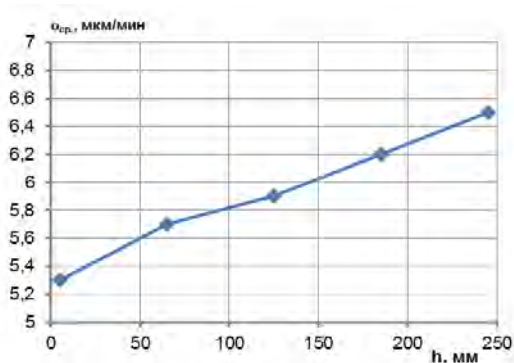


Рисунок 4.6 – Влияние глубины погружения на среднюю скорость съема

Представленная зависимость имеет линейный характер, что согласуется с данными (раздел 4.1), полученными при обработке вертикальноориентированного образца, согласно которым в зоне устойчивой парогазовой оболочки также зафиксировано близкое к линейному изменение величины съема от глубины погружения обрабатываемой поверхности образца.

Из представленной зависимости видно, скорость съема при увеличении глубины погружения с 5 до 245 мм увеличивается в 1,2 раза, при этом было отмечено увеличение плотности тока с 0,36 до 0,44 А/см². Очевидно, что такая зависимость сохранится вплоть до значения глубины, при котором гидростатическое давление станет настолько высоким, что образование парогазовой оболочки будет невозможным.

В практике ЭПО при полировании изделий глубина погружения определяется глубиной рабочей ванны и обычно не превышает 700 мм [81]. Однако реализация процесса размерной обработки длинномерных цилиндрических изделий, таких как концентраторы-инструменты, длиной до 1200 мм и диаметром менее 1,8 мм на большой глубине затруднена. При обработке на большой глубине возникают технологические трудности, связанные с необходимостью применения рабочей ванны большого объема, с креплением изделий, с контролем их размеров, с перекачкой и дополнительным подогревом электролита. Поэтому для выполнения дальнейших исследований принята глубина погружения 125 мм, приемлемая для практической реализации размерной ЭПО концентраторов-инструментов.

4.2.2 Влияние температуры электролита на скорость съема

Температурные условия в приэлектродной зоне и в электролите играют существенную роль в процессе ЭПО. Существование стабильной парогазовой оболочки и устойчивое протекание процесса ЭПО возможно только в определенном диапазоне температур электролита. В хорошо прогретом электролите (70–99 °С) обеспечивается устойчивая обработка и достигается высокое качество поверхности

сти, а при снижении температуры электролита ниже 40 °С имеет место нагрев образцов [81].

Исследования влияния температуры электролита на скорость съема проводились в диапазоне температур электролита 42–99 °С. Обработка осуществлялась при глубине погружения 125 мм и рабочем напряжении 300 В. Продолжительность обработки образцов составляла 10 мин.

По результатам измерения диаметра образцов после обработки рассчитаны значения средней скорости съема. Зависимость средней скорости съема от температуры электролита представлена на рисунке 4.7 [133–135].

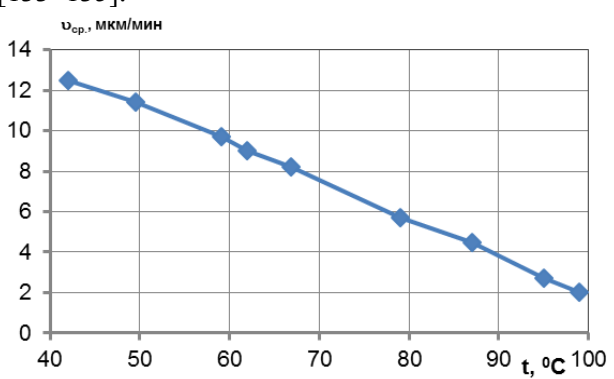


Рисунок 4.7 – Влияние температуры электролита на среднюю скорость съема

Из представленной зависимости следует, что чем ниже температура (в пределах исследуемого интервала), тем интенсивнее процесс ЭПО. Повышенную интенсивность съема при низких температурах можно объяснить уменьшенным парообразованием, формирующим толщину парогазовой оболочки, и возрастающей интенсивностью протекающих в парогазовой оболочке физико-химических процессов. Средняя скорость съема при температуре электролита 42 °С составила 12,5 мкм/мин. При этом плотность тока составляла 0,66 А/см².

Обработка образцов при низких температурах электролита (менее 60 °С) сопровождалась периодическим срывом процесса из-за нарушения сплошности парогазовой оболочки, что приводило к возникновению значительных бросков рабочего тока. В результате

наблюдался нагрев образцов и образование прижогов в местах подвода рабочего напряжения к образцам.

Дальнейшее увеличение температуры электролита (до 70–95 °С) обеспечило стабильность процесса ЭПО. Однако, в результате повышения температуры усилилось парообразование и увеличилась толщина парогазовой оболочки. Это привело к снижению средней скорости съема до 7,5 мкм/мин при температуре 70 °С и до 3,8 мкм/мин при температуре 90 °С.

При достижении электролитом температуры 95–99 °С образец оказался погруженным в сплошную подвижную пену. При этом средняя скорость съема снизилась до 2 мкм/мин, а плотность тока до 0,25 А/см².

4.2.3 Влияние рабочего напряжения на скорость съема

Рабочее напряжение является важнейшим параметром, определяющим устойчивость парогазовой оболочки и стабильность ЭПО. С увеличением рабочего напряжения возрастает энергия, выделяющаяся в парогазовой оболочке, что приводит к росту температуры анода и увеличению толщины парогазовой оболочки [81, 136–138]. Поскольку толщина парогазовой оболочки является основной характеристикой, определяющей съем, то её увеличение при повышении напряжения неизбежно приведет к снижению скорости съема.

Для ЭПО различных материалов обычно используются источники питания с напряжением 280–320 В. Из практического опыта известно, что при обработке изделий сложной формы, имеющих выступы, углубления или острые участки, снижение напряжения хотя бы до 250 В приводит к нарушению устойчивости парогазовой оболочки и срыву процесса обработки. При обработке изделий простой формы (в том числе и цилиндрической), минимальное значение напряжения, при котором обеспечивается протекание стабильного процесса ЭПО, снижается.

Исследование влияния рабочего напряжения на скорость съема при обработке цилиндрических поверхностей проводилось в диапазоне от 200 до 300 В. Регулировка напряжения осуществлялась с шагом 20 В с помощью ЛАТРа. Образцы обрабатывались при глу-

бине погружения 125 мм и температуре электролита 80 °С. Продолжительность обработки составляла 10 мин.

По результатам измерения съема на образцах после обработки построена зависимость, характеризующая влияние рабочего напряжения на изменение средней скорости съема (рисунок 4.8).

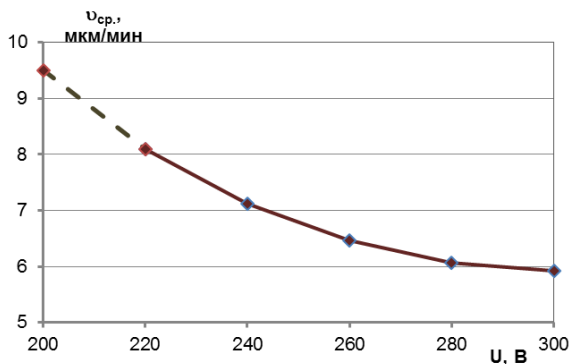


Рисунок 4.8 – Влияние рабочего напряжения на среднюю скорость съема

Полученная в результате исследований зависимость имеет гиперболический характер. При снижении рабочего напряжения с 300 В до 200 В средняя скорость съема повысилась в 1,6 раза (с 5,9 мкм/мин до 9,5 мкм/мин). Плотность тока при этом снизилась с 0,64 до 0,4 А/см².

Следует отметить, что обработка образцов при значениях рабочего напряжения до 220 В сопровождалась периодическим нарушением устойчивости парогазовой оболочки и срывом процесса ЭПО. При напряжениях от 240 В до 300 В процесс обработки протекал стабильно.

4.2.4 Влияние радиуса кривизны обрабатываемой поверхности на скорость съема

Для установления влияния радиуса кривизны на скорость съема исследовалась динамика изменения диаметра образцов при глубине погружения 125 мм. Продолжительность обработки составляла от 20 до 180 мин с шагом 20 мин. Обработка проводилась при рабочем

напряжении 300 В и температуре электролита 80 °С. На рисунке 4.9 представлена зависимость, характеризующая динамику изменения диаметра образца.

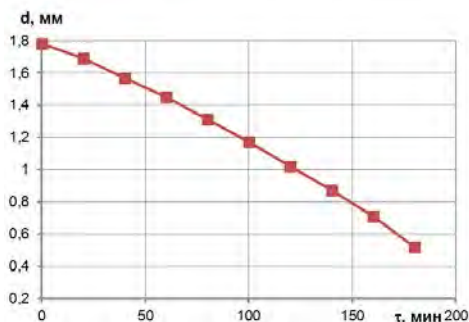


Рисунок 4.9 – Влияние продолжительности обработки на изменение диаметра заготовки при глубине погружения 125 мм

Представленная кривая имеет параболический характер. По мере увеличения продолжительности обработки происходит более интенсивное уменьшение диаметра образцов. На рисунке 4.10 представлена зависимость средней скорости съема от радиуса кривизны образца для глубины погружения 125 мм, полученная на основании экспериментальных данных. Расчет значений средней скорости съема проводился для каждой стадии обработки продолжительностью 20 мин.

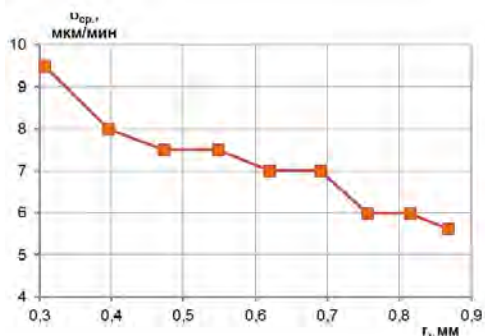


Рисунок 4.10 – Влияние радиуса кривизны на среднюю скорость съема при глубине погружения 125 мм

Полученная зависимость имеет падающий характер. При увеличении радиуса кривизны наблюдается значительное снижение скорости съема. Так, при радиусе кривизны 0,33 мм скорость съема составляла 9,5 мкм/мин, а при увеличении радиуса кривизны до 0,87 мм скорость съема снизилась до 5,7 мкм/мин. Значение плотности тока при этом снизилось с 0,68 до 0,41 А/см².

4.3 Математическая модель для расчета скорости съема металла при электролитно-плазменной обработке длинномерных цилиндрических поверхностей

При проведении экспериментальных исследований влияния технологических параметров при ЭПО цилиндрических поверхностей (напряжение, температура электролита, глубина погружения), а также радиуса кривизны на съем было установлено, что повышение скорости съема сопровождается увеличением плотности рабочего тока. Для установления характера влияния плотности рабочего тока на скорость съема металла проводилась обработка образцов при различных значениях температуры электролита. Значение температуры электролита изменялось в диапазоне от 60 до 80 °С с шагом 5 °С, что обеспечило изменение плотности тока в диапазоне от 0,605 до 0,305 А/см². Обработка образцов проводилась при рабочем напряжении 300 В и глубине погружения 20 мм.

Для исследований использовались пластины из стали 12Х18Н9 с размерами 24x10x1 мм. Продолжительность обработки составляла 3 мин. Масса образцов до и после обработки измерялась с помощью аналитических весов Ohaus Pioneer 214-РА (дискретность 0,0001 г). В качестве параметра, характеризующего скорость съема, использовалась величина массового съема с единицы поверхности за единицу времени ΔG (скорость массового съема). Экспериментальная зависимость скорости массового съема от плотности тока представлена на рисунке 4.11.

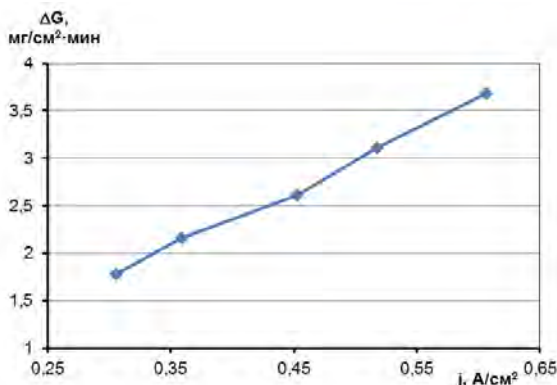


Рисунок 4.11 – Экспериментальная зависимость скорости массового съема от плотности тока

Из рисунка 4.11 видно, что зависимость скорости массового съема от плотности тока имеет линейный характер. Таким образом, полученные результаты дают основание утверждать, что скорость съема металла в процессе ЭПО прямо пропорциональна плотности рабочего тока.

Расчет величины съема при размерной ЭПО цилиндрической поверхности малого диаметра затруднен тем, что обработка сопровождается постепенным уменьшением радиуса кривизны и, соответственно, повышением скорости съема. Для количественной оценки съема металла в процессе ЭПО необходимо установить связь плотности тока с технологическими параметрами и радиусом кривизны.

Поскольку скорость съема металла при ЭПО пропорциональна плотности рабочего тока, то по аналогии с законом Фарадея, масса (или объем) металла ΔV , удаленного с заготовки, прямо пропорциональна электрическому заряду, прошедшему через электролит:

$$\Delta V = k_v \eta_a It, \quad (4.1)$$

где k_v – объемный электрохимический эквивалент вещества (для коррозионностойких аустенитных сталей составляет $2,16 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{мин})$);

η_a – коэффициент выхода по току;

I – сила тока, проходящего через электролит, А;

t – продолжительность обработки, мин.

Определим зависимость, характеризующую влияние радиуса кривизны обрабатываемой цилиндрической поверхности на плотность тока. Для этого рассмотрим анод, на котором присутствуют прямолинейный и криволинейный участки (рисунок 4.12). Толщина парогазовой оболочки на прямолинейном участке – l_0 , на криволинейном – l_1 . Будем считать, что гидростатическое давление, действующее на парогазовую оболочку вокруг всех участков анода, одинаково. Систему анод – парогазовая оболочка – электролит будем рассматривать как плоский конденсатор [87].

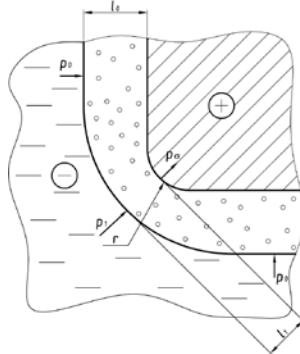


Рисунок 4.12 – Расчетная схема формирования парогазовой оболочки на прямолинейном и криволинейном участках поверхности

На плоском участке внешнее гидростатическое давление компенсируется давлением p_0 , создаваемым силой воздействия поверхности анода на поверхность электролита, которое определяется по формуле [139]:

$$p_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2l_0^2}, \quad (4.2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость парогазовой оболочки;

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

U – напряжение, приложенное к аноду, В;

l_0 – расстояние между анодом и электролитом на плоском участке поверхности (толщина парогазовой оболочки), м.

На криволинейном участке гидростатическое давление компенсируется давлением p_1 :

$$p_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}{2l_1^2}, \quad (4.3)$$

где l_1 – расстояние между анодом и электролитом на криволинейном участке (толщина парогазовой оболочки), м,

и давлением p_σ , создаваемым силой поверхностного натяжения, которое для поверхности с наружным радиусом r составит:

$$p_\sigma = \frac{\sigma}{r}, \quad (4.4)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Давление p_σ действует в направлении центра кривизны поверхности и его действие приводит к снижению давления в парогазовой оболочке.

Исходя из вышесказанного, справедливо равенство:

$$p_0 = p_1 - p_\sigma \quad (4.5)$$

Подставим в равенство (4.5) значения p_0 , p_1 и p_σ из формул (4.2), (4.3) и (4.4). После преобразований получим уравнение:

$$\frac{1}{2l_1^2} = \frac{1}{2l_0^2} + \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0 U^2 r} \quad (4.6)$$

Рассмотрим участок прямолинейной поверхности площадью ΔS_0 , через который протекает ток силой I_0 . Плотность тока на прямолинейном участке j_0 составит:

$$j_0 = \frac{I_0}{\Delta S_0}. \quad (4.7)$$

Воспользовавшись законом Ома выражение (4.7) можно записать в виде:

$$j_0 = \frac{U}{R_0 \Delta S_0}, \quad (4.8)$$

где R_0 – сопротивление парогазовой оболочки на прямолинейном участке.

Выразим сопротивление парогазовой оболочки через удельное сопротивление парогазовой оболочки ρ :

$$R_0 = \rho \frac{l_0}{\Delta S_0}. \quad (4.9)$$

После подстановки (4.9) в выражение (4.8) и преобразования получим:

$$j_0 = \frac{U}{\rho l_0}. \quad (4.10)$$

Плотность тока на криволинейном участке j_1 можно представить аналогично (4.10):

$$j_1 = \frac{U}{\rho l_1} \quad (4.11)$$

Выразив из (4.10) и (4.11) значения l_0 и l_1 и подставив их в (4.5) после преобразования получим выражение:

$$j_1 = \sqrt{j_0^2 + \frac{2 \cdot \sigma}{\rho^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}. \quad (4.12)$$

Анализ уравнений (4.10) и (4.11) позволяет утверждать, что произведение плотности тока на толщину парогазовой оболочки является равной величиной для любого участка поверхности. Назовём эту величину коэффициентом плотности тока k . Тогда:

$$k = j_0 l_0 = j_1 l_1 = \frac{U}{\rho} \quad (4.13)$$

Из (4.13) выразим удельное сопротивление через напряжение и коэффициент k и подставим в выражение (4.12).

$$j_1 = \sqrt{j_0^2 + \frac{2 \cdot k^2 \cdot \sigma}{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}. \quad (4.14)$$

Полученная формула описывает влияние радиуса кривизны обрабатываемой поверхности и рабочего напряжения на плотность тока и позволяет определить плотность тока вокруг цилиндрической поверхности на любой стадии размерной обработки.

Величина j_0 характеризует плотность тока на плоской поверхности при равных с цилиндрической поверхностью условиях обработки (температура электролита, рабочее напряжение, глубина погружения). Назовем её эквивалентной плотностью тока.

Из формулы (4.1) следует, что объемная скорость съема при обработке составляет:

$$v = I k_v \eta_a. \quad (4.15)$$

Заменив в (4.15) силу тока I произведением плотности тока j_1 на площадь поверхности цилиндра после преобразований получим:

$$v_{\text{цил}} = 2\pi r L k_v \eta_a \sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2\sigma}{U^2\varepsilon\varepsilon_0 r}}, \quad (4.16)$$

где r – радиус кривизны цилиндрической поверхности, м;
 L – длина цилиндра, м;
 k_v – объемный электрохимический эквивалент вещества, м³/А·мин;

η_a – коэффициент выхода по току;

j_0 – эквивалентная плотность тока, А/м²;

k – коэффициент плотности тока, А/м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

U – рабочее напряжение, В;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость парогазовой оболочки;

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

Выведем формулу для расчета продолжительности размерной обработки. Пусть за промежуток времени dt с цилиндрической поверхности радиусом r удаляется бесконечно малый слой металла толщиной dr .

Объемную скорость съема можно представить как отношение объема удаляемого слоя к промежутку времени, за который этот слой удаляется:

$$v_{\text{цил}} = 2\pi r L \frac{dr}{dt}. \quad (4.17)$$

После подстановки (4.17) в (4.16) и преобразования получим:

$$dt = \frac{1}{k_v \eta_a} \frac{dr}{\sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2 \sigma}{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}}. \quad (4.18)$$

Общее время, необходимое для съема металла с цилиндра с исходным радиусом $r_{\text{исх}}$ до конечного радиуса $r_{\text{кон}}$ определится по формуле:

$$t = \frac{1}{k_v \eta_a} \int_{r_{\text{кон}}}^{r_{\text{исх}}} \frac{dr}{\sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2 \sigma}{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}}, \quad (4.19)$$

где k_v – объемный электрохимический эквивалент вещества, $\text{м}^3/(\text{А} \cdot \text{мин})$;

η_a – коэффициент выхода по току;

j_0 – эквивалентная плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$;

k – коэффициент плотности тока, $\text{А}/\text{м}$;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Н}/\text{м}$;

U – рабочее напряжение, В;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость парогазовой оболочки;

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

r – радиус кривизны цилиндрической поверхности, м;

$r_{исх}$ – исходный радиус, м;

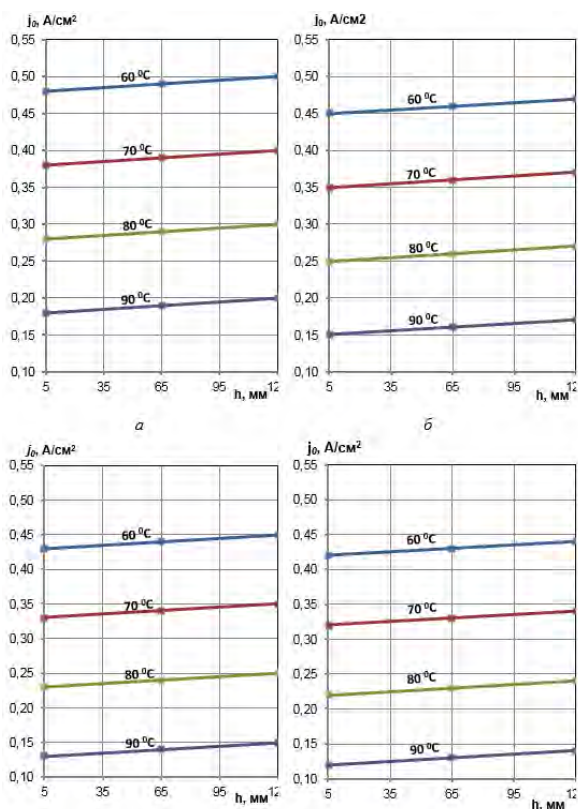
$r_{кон}$ – конечный радиус, м.

Для построения номограмм, позволяющих определить эквивалентную плотность тока j_0 , проводилось измерение величины рабочего тока при обработке плоских образцов толщиной 0,6 мм прямоугольной формы. Глубина погружения варьировалась в пределах от 5 до 125 мм, температура электролита – в пределах от 60 до 90 °С. Обработка проводилась в 4 % растворе сульфата аммония при значениях рабочего напряжения 240, 260, 280 и 300 В. Измерения силы тока проводились с помощью цифрового амперметра, последовательно включенного в цепь.

Поскольку плоские образцы имеют по периметру кромку с радиусом кривизны, оказывающим значительное влияние на формирование общей плотности тока, то для исключения этого влияния для каждого эксперимента обрабатывалось по два плоских образца, имеющих одинаковый периметр, но разную площадь поверхности. Для проведения экспериментов были выбраны образцы с размерами 10x40x0,6 мм и 20x30x0,6 мм. Разность площади таких образцов составляет 4 см². На различных режимах измерялся рабочий ток каждого из образцов. Плотность тока определялась как отношение разницы рабочего тока образцов к разнице их площади (4 см²). На основании полученных результатов построены номограммы, характеризующие зависимость эквивалентной плотности тока j_0 от температуры электролита и глубины погружения при различных значениях рабочего напряжения (рисунок 4.13).

Для экспериментальной проверки зависимости (4.14) проводилось измерение рабочего тока при обработке цилиндрических образцов из стали 12Х18Н9 длиной 50 мм и диаметром 0,5; 1,0; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5; 4,0; и 6,0 мм. Обработка проводилась при рабочем напряжении 300 В. Температура электролита составляла 80 °С. Глубина погружения образцов – 20 мм. По измеренным значениям силы тока были рассчитаны экспериментальные значения плотности тока для каждого из образцов (таблица 4.1).

В таблице 4.1 также приведены расчетные значения плотности тока, полученные с помощью зависимости (4.14), и скорости съема, полученные по формуле (4.16). При расчетах величина эквивалентной плотности тока j_0 согласно вышеприведенной номограмме (рисунок 4.13) принималась равной $0,22 \text{ A/cm}^2$. Кроме того, при расчетах использовался коэффициент $m = \frac{2 \cdot k^2 \cdot \sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}$, состоящий из постоянных величин. Его экспериментально установленное значение составляет $0,802 \cdot 10^3 \text{ В}^4 / (\text{Ом}^2 \cdot \text{м}^3)$.



а – 240 В, б – 260 В, в – 280 В, г – 300 В
 Рисунок 4.13 – Зависимость эквивалентной плотности тока от температуры электролита и глубины погружения

Таблица 4.1 – Расчетные и экспериментальные значения плотности тока

Номинальный диаметр, мм	Длина, мм	Площадь, см ²	Измеренное значение силы тока, А	Экспериментальное значение плотности тока, А/см ²	Расчетное значение плотности тока, А/см ²	Расчетное значение скорости съема, мкм/мин
0,5	50	0,79	0,54	0,69	0,64	10,4
1,0	50	1,55	0,83	0,54	0,48	8,1
1,5	50	2,27	0,97	0,43	0,41	6,5
1,8	50	2,67	1,02	0,38	0,39	5,8
2,0	50	3,05	1,05	0,34	0,37	5,2
2,5	50	3,76	1,21	0,32	0,35	4,9
4,0	50	6,25	1,94	0,31	0,31	4,7
6,0	50	9,64	2,50	0,26	0,28	3,9

На основании полученных расчетных и экспериментальных данных построены зависимости, характеризующие влияние радиуса кривизны обрабатываемой поверхности на плотность тока (рисунок 4.14). Анализ представленных зависимостей позволяет утверждать, что полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными. Это подтверждает предложенную модель процесса съема металла при ЭПО цилиндрических поверхностей [140, 141].

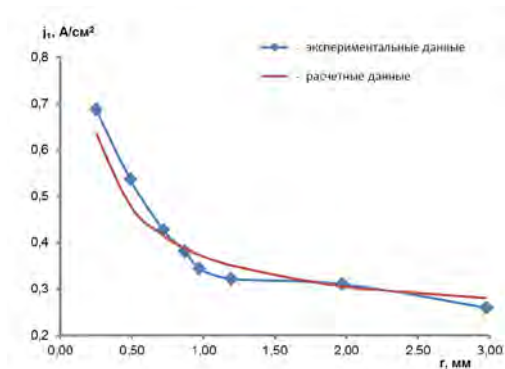
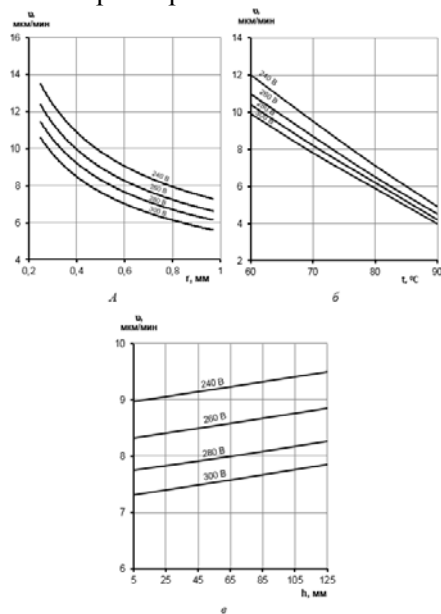


Рисунок 4.14 – Экспериментальная и расчетная зависимости плотности тока от радиуса кривизны

Полученные зависимости имеют гиперболический характер. Значение эквивалентной плотности тока j_0 является горизонтальной асимптотой зависимостей. С увеличением радиуса кривизны до бесконечности (прямолинейная поверхность), величина плотности тока стремится к эквивалентной плотности тока j_0 . Аналогичный гиперболический характер имеет экспериментальная зависимость скорости съема от радиуса кривизны (рисунок 4.10).

На рисунке 4.15 представлены зависимости скорости съема от технологических параметров размерной ЭПО и радиуса кривизны, рассчитанные по формуле (4.16). Расчеты производились в следующих диапазонах: температура электролита – от 60 до 90 °С, глубина погружения – от 5 до 125 мм, рабочее напряжение – от 240 до 300 В, радиус кривизны – от 0,2 до 1 мм. Полученные расчетные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными зависимостями, полученными в разделе 4.2, что также подтверждает применимость формулы (4.16) для определения скорости съема металла в указанных диапазонах параметров.



а – от радиуса кривизны при $t = 80^\circ \text{C}$ и $h = 125 \text{ мм}$; б – от температуры электролита при $r = 0,9 \text{ мм}$ и $h = 5 \text{ мм}$; в – от глубины погружения при $t = 70^\circ \text{C}$ и $r = 0,9 \text{ мм}$

Рисунок 4.15 – Расчетные зависимости скорости съема от технологических параметров размерной ЭПО и радиуса кривизны

4.4 Оптимизация параметров размерной электролитно-плазменной обработки длинномерных цилиндрических поверхностей

Для определения сил влияния факторов, получения интерполяционной зависимости и оптимизации параметров размерной ЭПО цилиндрических поверхностей проведен трехфакторный трехуровневый эксперимент по плану Бокса-Бенкина.

План Бокса-Бенкина размерности $K = 3$ позволяет провести математико-статистическую обработку данных при варьировании трех компонентов на трех уровнях [142]. Такие планы обеспечивают минимальный объем эллипсоида рассеивания оценок параметров, минимизируют максимальную дисперсию в заданной области плана, обладают свойством рототабельности и имеют наименьший определитель ковариационной матрицы. Свойство рототабельности сводится к тому, что точки матрицы планирования подбираются с обеспечением одинаковой точности предсказания значений функций отклика и независимости от направления исследования [142].

План Бокса-Бенкина представляет собой определенные выборки из полного факторного эксперимента типа 3^K , где K – число факторов, равное трем, а 3 – число уровней (+1, 0, -1), на которых варьируется каждая переменная.

Обработка образцов проводилась с помощью оснастки, использовавшейся при проведении экспериментальных исследований (раздел 2.6). В качестве образцов для проведения исследований использовались прутки из стали 12Х18Н9 номинальным диаметром 1,8 мм с длиной обрабатываемой части 50 мм. Продолжительность обработки для каждого образца составляла 5 мин.

В качестве параметра оптимизации размерной ЭПО принята скорость съема металла. В качестве независимых переменных, определяющих параметр оптимизации приняты: температура электролита t , °С; глубина погружения в электролит h , мм; рабочее напряжение U , В. Постоянным параметром был принят радиус кривизны обрабатываемой поверхности ($r = 0,9$ мм).

Исследуемые уровни варьирования факторов были выбраны на основании проведенных экспериментальных исследований процесса размерной ЭПО (раздел 4.2):

$$\text{температура электролита, } ^\circ\text{C: } x_1 = \begin{pmatrix} - & 0 & + \\ 70 & 80 & 90 \end{pmatrix},$$

$$\text{глубина погружения, мм: } x_2 = \begin{pmatrix} - & 0 & + \\ 5 & 65 & 125 \end{pmatrix},$$

$$\text{рабочее напряжение, В: } x_3 = \begin{pmatrix} - & 0 & + \\ 240 & 270 & 300 \end{pmatrix}.$$

По результатам расчетов получены следующие значения коэффициентов регрессии:

$$b_0 = 5,96$$

$$b_1 = -2,12$$

$$b_2 = 0,28$$

$$b_3 = -0,6$$

$$b_{12} = -0,1$$

$$b_{13} = -0,24$$

$$b_{23} = -0,02$$

$$b_{11} = 0,08$$

$$b_{22} = -0,08$$

$$b_{33} = 0,28$$

Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и при числе степеней свободы $f = 15$ значение критерия Стьюдента $t_{Cm} = 2,13$. Тогда значения доверительных интервалов для коэффициентов составляют:

$$\Delta b_0 = \pm 2,13 \cdot 0,0567 = 0,1205;$$

$$\Delta b_i = \pm 2,13 \cdot 0,0347 = 0,074;$$

$$\Delta b_i = \pm 2,13 \cdot 0,0491 = 0,1044;$$

$$\Delta b_i = \pm 2,13 \cdot 0,0567 = 0,1205.$$

Таким образом, коэффициенты b_{11} , b_{12} , b_{22} и b_{23} незначимы, так как их значения меньше доверительных интервалов.

Уравнение регрессии после исключения незначимых коэффициентов имеет следующий вид:

$$Y=b_0+b_1\cdot X_1+b_2\cdot X_2+b_3\cdot X_3+b_{13}\cdot X_1X_3+b_{33}\cdot X_3^2. \quad (4.20)$$

В раскодированном виде уравнение для определения средней скорости съема металла в зависимости от технологических параметров обработки, запишется в следующем виде:

$$v_{cp.} = 5,96 - 2,12\cdot t + 0,28\cdot h - 0,6\cdot U + 0,24\cdot t\cdot U + 0,28\cdot U^2 \quad (4.21)$$

где t – температура электролита, $^{\circ}\text{C}$;

h – глубина погружения заготовки в электролите, мм;

U – рабочее напряжение, В.

С использованием метода крутого восхождения установлено, что максимальное значение скорости съема составляет 9,5 мкм/мин и достигается при следующих значениях технологических параметров ЭПО: температура электролита – 70 $^{\circ}\text{C}$, глубина погружения – 125 мм, рабочее напряжение – 240 В.

На основании уравнения регрессии построена диаграмма, характеризующая поверхность распределения средней скорости съема в зависимости от рабочего напряжения и температуры электролита для глубины погружения 125 мм (рисунке 4.16) [143, 144].

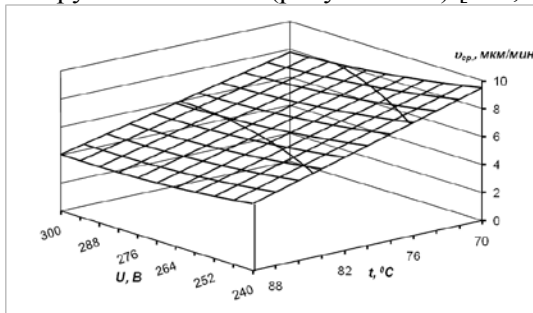


Рисунок 4.16 – Зависимость средней скорости съема от рабочего напряжения и температуры электролита при глубине погружения 125 мм

На рисунке 4.17 представлена диаграмма, отображающая относительное влияние исследуемых факторов на скорость съема.



Рисунок 4.17 – Относительное влияние факторов

Из представленной диаграммы видно, что максимальное влияние на скорость съема металла оказывает температура электролита (X1). Влияние глубины погружения (X2), рабочего напряжения (X3) и совместного влияния температуры и напряжения (X1X3) слабы по сравнению с температурой электролита (X1).

ГЛАВА 5

РАЗРАБОТКА И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ КОНЦЕНТРАТОРОВ-ИНСТРУМЕНТОВ

5.1 Технология изготовления сложнопрофильных ультразвуковых медицинских концентраторов-инструментов

На основании результатов исследований, проведенных в главах 3 и 4, разработана технология получения сложнопрофильных ультразвуковых медицинских концентраторов-инструментов малого диаметра, включающая процесс изготовления заготовки волочением с применением промежуточной ЭПО и процесс формообразования поверхностей концентраторов-инструментов методом размерной ЭПО.

5.1.1 Получение заготовки концентратора-инструмента волочением с промежуточной электролитно-плазменной обработкой

Результаты исследований, проведенных в главе 3, показали, что при волочении заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н9 применение ЭПО между проходами волочения обеспечивает повышение усталостной прочности материала и повышение интенсивности передаваемого ультразвука. Промежуточная ЭПО продолжительностью 3 мин обеспечивает наиболее приемлемое сочетание высокой прочности и низких остаточных напряжений в материале.

На основании полученных результатов разработан процесс получения заготовки концентратора-инструмента волочением с промежуточной ЭПО. Разработанный процесс основан на маршруте волочения, приведенном в таблице 2.4. Данный маршрут волочения включает семь проходов и обеспечивает суммарное обжатие $\delta_{\text{сум.}} = 80\%$. Дополнительно между проходами волочения проводится ЭПО продолжительностью 3 мин.

В качестве исходной заготовки используется калиброванный прутки из стали 12Х18Н9 с номинальным диаметром 4 мм длиной 250 мм. После волочения до конечного диаметра 1,8 мм длина прутка составляет 900 мм. Для разупрочнения исходной заготовки проводится закалка при температуре 1150 °С с охлаждением в воду.

Для выполнения волочения используется цепной волочильный стан. Скорость волочения составляет 20 м/мин. Для волочения применяются волоки, изготовленные из сплава ВК6 с углом рабочего конуса 8°. В качестве смазки используется натриевое мыло.

Промежуточная ЭПО проводится в электролите на основе 4 % раствора сульфата аммония при следующих технологических параметрах: рабочее напряжение – 300 В, температура электролита– 80 °С, глубина погружения – 125 мм.

Последовательность операций при получении заготовки концентратора-инструмента приведена на рисунке 5.1.

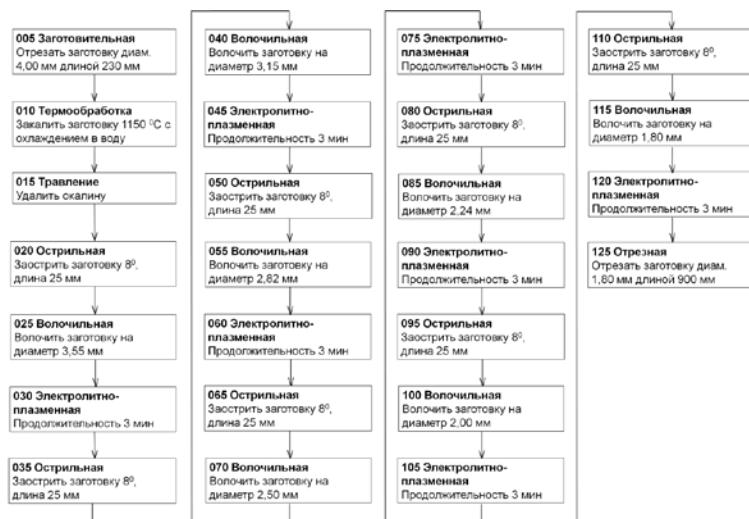


Рисунок 5.1 – Последовательность операций в процессе получения заготовки концентратора-инструмента

Разработанный процесс волочения с промежуточной ЭПО обеспечивает получение прутка (заготовки для концентратора-инструмента) с повышенными акустическими и прочностными ха-

рактическими. По сравнению с обычным волочением обеспечивается повышение усталостной прочности материала на 21 % и повышение интенсивности передаваемого ультразвука на 22–24 %.

На предложенный способ изготовления заготовок концентраторов-инструментов получен патент Республики Беларусь на полезную модель по заявке № 9134 от 30.04.2013 г. [145].

5.1.2 Формообразование поверхностей концентратора-инструмента методом размерной электролитно-плазменной обработки

Проведенные исследования закономерностей съема металла при ЭПО цилиндрических поверхностей позволили установить, что скорость размерного съема для образцов диаметром 1,8 мм в зависимости от технологических параметров обработки может достигать 9,5 мкм/мин (0,57 мм/ч). Увеличение продолжительности обработки до 1–2 ч обеспечивает возможность использовать ЭПО в качестве размерной обработки для формообразования ступеней концентраторов-инструментов диаметром до 0,5 мм.

В качестве примера рассмотрен процесс формообразования поверхностей трехступенчатого концентратора-инструмента, конструкция которого, представлена на рисунке 5.2.

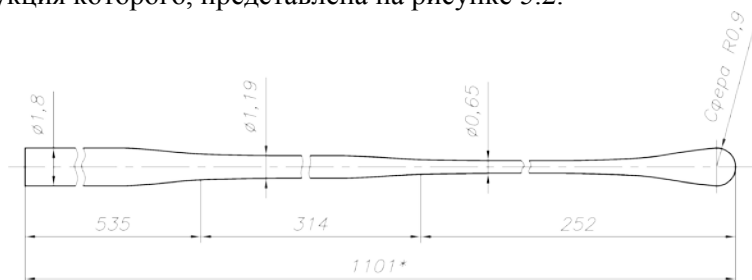


Рисунок 5.2 – Пример трехступенчатого концентратора-инструмента

Основными требованиями при формообразовании поверхности концентраторов-инструментов методом размерной ЭПО являются контроль технологических параметров процесса, главным образом

температуры электролита, а также обеспечение осевого вращения заготовки в процессе обработки с целью исключения неравномерности съема металла на различных поверхностях формируемого профиля, что было отмечено в разделе 4.1.

На рисунке 5.3 приведена технологическая схема формообразования цилиндрических поверхностей на примере трехступенчатого концентратора-инструмента, представленного на рисунке 5.2.

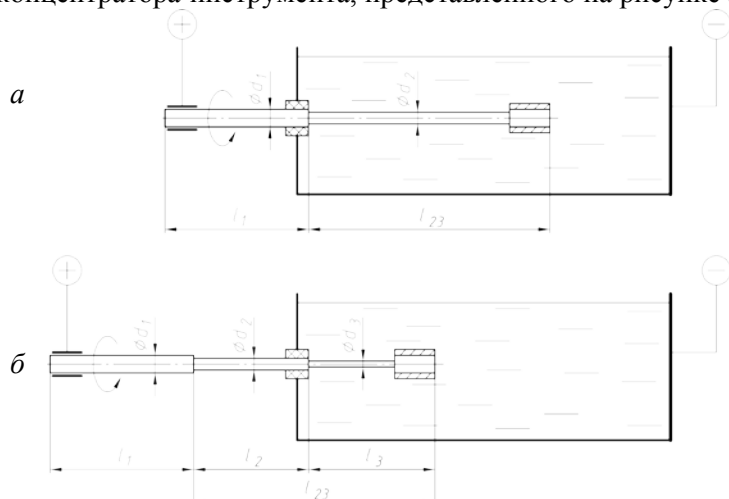


Рисунок 5.3 – Технологическая схема формообразования цилиндрических поверхностей концентраторов-инструментов

Обработка осуществляется в следующей последовательности. Место предполагаемого рабочего наконечника закрывается защитной втулкой. Исходный пруток с диаметром, равным диаметру первой ступени концентратора-инструмента ($d_1 = 1,8$ мм) помещается в рабочую зону на длину, равную сумме длин второй и третьей ступени концентратора-инструмента $l_{23} = 566$ мм (рисунок 5.3а). Обработка ведется до достижения требуемого диаметра второй ступени ($d_2 = 1,19$ мм). После этого заготовка выдвигается из рабочей зоны с таким условием, чтобы длина оставшейся в рабочей зоне части заготовки была равна длине третьей ступени $l_3 = 214$ мм (рисунок 5.3б). Обработка осуществляется до достижения необходимого диаметра третьей ступени ($d_3 = 0,65$ мм).

В случае если исходный диаметр прутка превышает требуемый диаметр первой ступени, то вся заготовка общей длиной, также может быть обработана до достижения требуемого диаметра первой ступени.

Расчет необходимой продолжительности обработки производится по формуле (4.19). Согласно проведенным в главе 4 исследованиям, максимальный съем металла достигается при следующих технологических параметрах: температура электролита – 70 °С, глубина погружения – 125 мм, рабочее напряжение – 240 В. Для таких параметров обработки значение эквивалентной плотности тока j_0 , принятое из номограммы, приведенной на рисунке 4.13а, составляет 0,4 А. Необходимая продолжительность обработки составляет: для формирования второй ступени – 55,7 мин, для формирования третьей ступени – 42,5 мин. Таким образом, суммарная продолжительность обработки составляет 98,2 мин.

При проведении измерений геометрических размеров полученной цилиндрической поверхности было установлено, что овальность его профиля составляет не более 0,005 мм. Это значение не превышает значение овальности исходной заготовки и является допустимым для цилиндрической поверхности концентратора-инструмента.

Новизна предложенного способа формообразования подтверждена евразийским патентом № 005704 от 28.04.2005 [47] и патентом на изобретение Республики Беларусь № 15730 от 30.04.2012 [146].

Как уже было отмечено ранее, в узловых точках концентраторов-инструментов происходит усиление мощности ультразвуковой волны. Профиль переходов концентраторов-инструментов должен быть плавным для того, чтобы вдоль их оси не возникало концентраторов напряжений. Плавность профиля позволяет обеспечить увеличение амплитуды продольных колебаний рабочего наконечника, а также повышение надежности в эксплуатации за счет плавного изменения напряжений по всей длине концентратора-инструмента. Для снижения потерь в узловых точках концентратора-инструмента предложен профиль перехода, имеющий плавную форму по типу концентратора Фурье [47]. Рассчитанный оптимальный профиль плавного перехода между первой и второй ступенями рассматриваемого концентратора-инструмента представлен на рисунке 5.4.

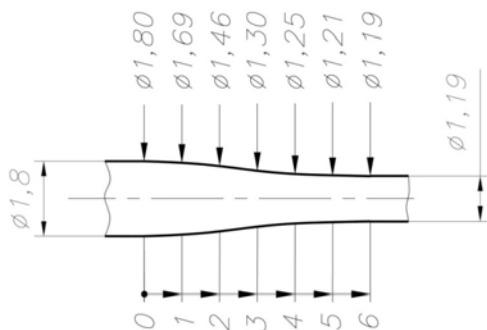


Рисунок 5.4 – Форма плавного перехода концентратора-инструмента (переход с 1,8 на 1,19 мм)

При формировании цилиндрических поверхностей концентраторов-инструментов согласно технологической схеме, при которой заготовка размещается горизонтально, формирование плавных переходов с заданным криволинейным профилем имеет некоторые сложности. В то же время обработка с вертикальной ориентацией заготовки обеспечивает получение плавного перехода, близкого по форме к оптимальному, но не позволяет получать ступени концентраторов-инструментов правильной цилиндрической формы из-за неравномерности размерного съема по глубине.

В случае вертикальной обработки формирование плавного перехода происходит на границе электролит-воздух (рисунок 5.5). Вокруг цилиндрической заготовки, погружённой в электролит, в результате ЭПО возникают восходящие потоки электролита, направленные к поверхности. На поверхности при этом формируется бурлящий фонтан кольцеобразной формы.

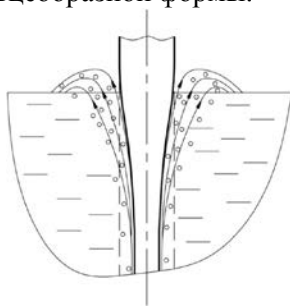


Рисунок 5.5 – Схема формирования перехода концентратора-инструмента на поверхности электролита при вертикальной обработке

На начальной стадии обработки, в результате съема металла с погруженной в электролит заготовки, в граничной зоне происходит образование ступени. При дальнейшей обработке в зоне сформированной ступени происходит завихрение потоков электролита и постепенное сглаживание ступени. Потоки электролита обтекают профиль заготовки по плавной образующей, обеспечивая формирование перехода концентратора-инструмента.

Формирование перехода при вертикальном погружении заготовки не требует применения какой-либо оснастки. Плавность получаемого профиля достигается благодаря естественным законам движения жидкостей. Фотография перехода, полученного на границе электролит-воздух, представлена на рисунке 5.6.

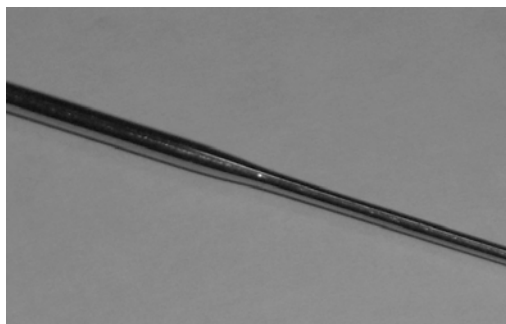


Рисунок 5.6 – Переход концентратора-инструмента, полученный на границе электролит-воздух

При горизонтальной обработке согласно разработанной технологической схеме, переход концентратора-инструмента формируется в зоне выхода заготовки из диэлектрической втулки, изолирующей заготовку-анод от ванны-катода. В процессе предварительных исследований для изоляции использовалась втулка, изготовленная из фторопласта. Разрядные процессы, происходящие в контактной зоне при обработке, приводят к горению и разрушению поверхности втулки, соприкасающейся с поверхностью заготовки. При этом на поверхности заготовки возникают питтинги – следы эрозионного разрушения поверхности.

При дальнейших исследованиях вместо фторопластовой использовалась керамическая втулка (рисунок 5.7). Это позволило избе-

жать горения и разрушения внутренней поверхности втулки, а также эрозию поверхности заготовки.

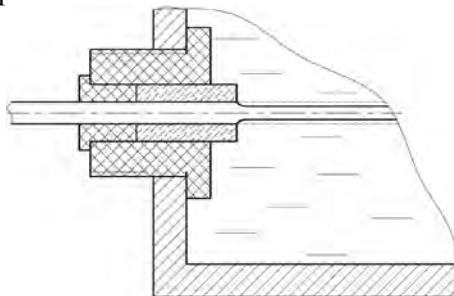


Рисунок 5.7 – Схема формирования перехода в керамической втулке

Существенным недостатком перехода, сформированного с использованием керамической втулки, было значительное отклонение его формы его профиля от требуемой. Профиль полученного перехода имел резко выраженную ступень (рисунок 5.8). Наличие такой ступени в узловой точке приводило к рассеянию и перераспределению ультразвуковой энергии, что при эксплуатации концентратора-инструмента становилось причиной разрушения или разогрева поверхности выше допустимых значений. Этот недостаток потребовал проведения дополнительных исследований, связанных с изучением особенной съема металла в зоне формирования плавных переходов концентратора-инструмента. В результате предложено два решения, позволяющих формировать плавные переходы с заданной формой профиля.



Рисунок 5.8 – Ступенчатый переход

Первое решение основано на том, что в процессе обработки осуществляется постепенное продольное перемещение (подача) заготовки в зону обработки. Формирование сложного профиля осуществляется за счет изменения скорости продольного перемещения по определенному закону, что позволяет увеличивать или уменьшать объем удаляемого металла на различных участках плавного перехода. Недостатком этого решения стала необходимость создания компьютерной программы, которая позволила бы управлять продольным перемещением заготовки по закону, обеспечивающему формирование заданного перехода с учетом постепенного уменьшения радиуса кривизны обрабатываемой поверхности. Другим недостатком являются жесткие требования по контролю и поддержанию значений технологических параметров в процессе обработки, т.к. даже их незначительные отклонения приведут к изменению скорости размерного съема и, соответственно, к отклонению профиля формируемого плавного от заданной формы.

Второе решение для формирования плавного перехода заданной формы основано на применении технологической втулки, имеющей специальный профиль. Схема формирования плавного перехода концентратора-инструмента представлена на рисунке 5.9.

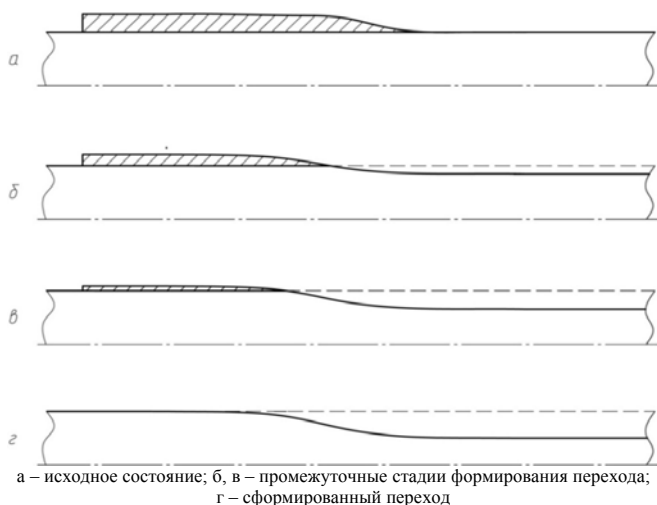


Рисунок 5.9 – Схема формирования плавного перехода с использованием втулки

Технологическая втулка нанизывается на заготовку и напрессовывается в зоне планируемого перехода концентратора-инструмента. Заготовка в сборе с втулкой обрабатывается до достижения требуемого диаметра следующей ступени. В процессе обработки происходит одновременное удаление металла с поверхности втулки и цилиндрической заготовки.

Профиль втулки рассчитывается таким образом, чтобы после обработки с продолжительностью, необходимой для формирования следующей ступени концентратора-инструмента, обеспечивалось получение плавного перехода заданной формы. Расчет профиля втулки производится с помощью формулы (4.19).

Продолжительность обработки для формообразования второй ступени концентратора-инструмента составляет 55,7 мин. На основании этой продолжительности с помощью программы Mathcad 14 по известным значениям заданных диаметров плавного перехода (нижний предел интегрирования) устанавливаются верхние пределы интегрирования определенного интеграла формулы (4.19), которые характеризуют значения необходимых диаметров технологической втулки. Согласно выполненным расчетам, для получения профиля плавного перехода, соответствующего профилю на рисунке 5.4, необходимо обеспечить профиль технологической втулки в соответствии с параметрами, приведенными в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры технологической втулки

Продольная координата l_i , мм	0	1	2	3	4	5	6
Диаметр перехода $d_{пер.i}$, мм	1,80	1,69	1,46	1,30	1,25	1,21	1,19
Диаметр втулки $d_{втул.i}$, мм	2,36	2,25	2,04	1,90	1,86	1,82	–

На рисунке 5.10 представлены кривые, характеризующие динамику изменения профиля плавного перехода в процессе обработки.

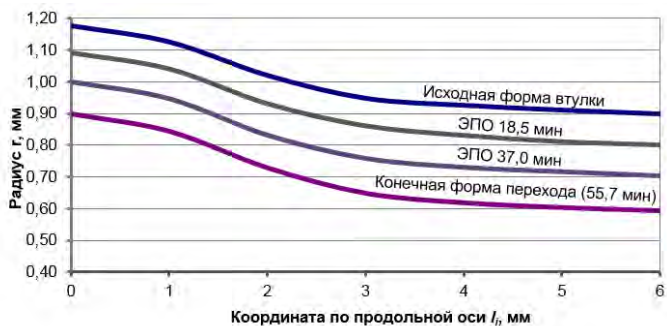


Рисунок 5.10 – Изменение профиля плавного перехода в процессе обработки

Чертеж технологической втулки представлен на рисунке 5.11. Хвостовая цилиндрическая часть втулки длиной 7 мм, предназначенна для обжима втулки на заготовке.

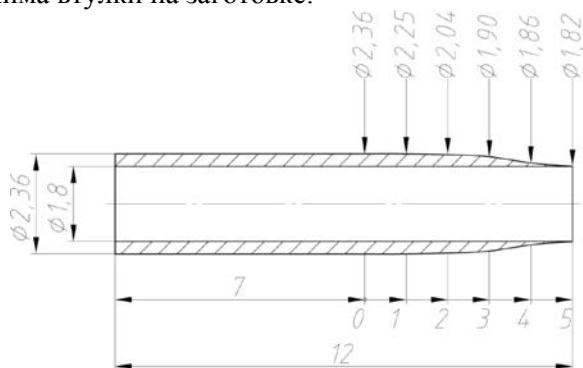


Рисунок 5.11 – Технологическая втулка для формирования плавного перехода

При изготовлении третьей ступени концентратора-инструмента, имеющей в рассматриваемом случае диаметр 0,65 мм, использование такой втулки невозможно, поскольку её внутренний диаметр (1,19 мм) не позволит нанизать втулку ни через первую ступень, ни через рабочий наконечник, имеющие диаметр 1,80 мм. В этом случае применяется составная втулка, в виде двух половин втулки, разрезанной по продольной оси.

В результате измерения формы перехода, полученного с использованием технологической втулки, установлено, что максимальное отклонение его профиля от заданной формы составляет 0,006 мм на сторону. Отклонение формы профиля связано, прежде всего, с от-

клонениями от номинальных размеров, допускаемыми при изготовлении технологической втулки. Полученная величина отклонения формы профиля не оказывает существенного влияния на качество передачи ультразвука при эксплуатации концентратора-инструмента, поскольку является незначительной.

На основании полученных результатов разработаны технологические процессы формообразования поверхностей ультразвуковых концентраторов-инструментов восьми типоразмеров методом размерной ЭПО (ТП № ИШПЖ 000025.001 – ИШПЖ 000025.008).

Последовательность операций в процессе формообразования поверхностей концентраторов-инструментов методом размерной ЭПО представлена на рисунке 5.12.

Преимуществами концентраторов-инструментов, полученных размерной ЭПО, являются: однородность характеристик материала по всей длине, соответствующих характеристикам исходной заготовки, поскольку ЭПО не оказывает силового и значимого температурного воздействия на материал; высокое качество поверхности; надежность рабочего наконечника за счет его формирования из цельной заготовки без дополнительной сварки или пайки.



Рисунок 5.12 – Последовательность операций в процессе формообразования поверхностей концентраторов-инструментов методом размерной ЭПО

В таблице 5.2 приведены характеристики материала по ступеням концентраторов-инструментов с диаметрами ступеней 1,8 мм, 1,19 мм и 0,65 мм.

Таблица 5.2 – Характеристики материала по ступеням концентраторов-инструментов

Характеристики	Ступень концентратора-инструмента		
	1	2	3
1. Микротвердость HV, МПа	370	380	400
2. Размер зерна, мкм	17–20	15–18	13–17
3. Предел прочности, МПа	1480	1500	1540

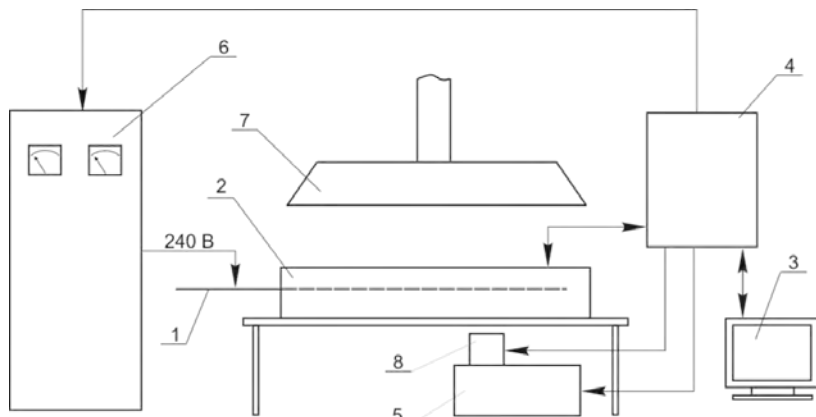
5.2 Оборудование для изготовления концентраторов-инструментов

Для формообразования концентраторов-инструментов методом ЭПО, а также для выполнения промежуточной ЭПО при волочении заготовок для концентраторов-инструментов, разработана и изготовлена специальная установка (КД № ИШПЖ 15.00.00.000). Установка включает рабочую ванну с исполнительными механизмами, бак с системой термостатирования электролита, насос, источник питания, систему вентиляции, блок управления установкой и персональный компьютер. Структурная схема установки приведена на рисунке 5.13.

Установка имеет следующие технические характеристики:

- общая мощность ТЭНов – 4,5 кВт;
- объем рабочей ванны – 20 л;
- длина рабочей ванны – 900 мм;
- объем бака – 40 л;
- рабочее напряжение – 200–300 В;
- частота осевого вращения – 60 мин⁻¹;
- производительность насоса системы прокачки электролита – 0,5 м³/ч;
- расход охлаждающей воды в теплообменнике ванны обработки – 0,1 м³/ч.

В качестве источника питания установки используется промышленный трехфазный выпрямитель ДФЗ. Для регулировки рабочего напряжения используется трехфазный ЛАТР, подключенный к вторичным обмоткам силового трансформатора источника питания.



1 – заготовка; 2 – рабочая ванна; 3 – персональный компьютер; 4 – блок управления; 5 – бак; 6 – источник питания; 7 – вытяжка; 8 – циркуляционный насос

Рисунок 5.13 – Структурная схема установки

Основным элементом установки является рабочая ванна. Общий вид рабочей ванны установки представлен на рисунке 5.14.

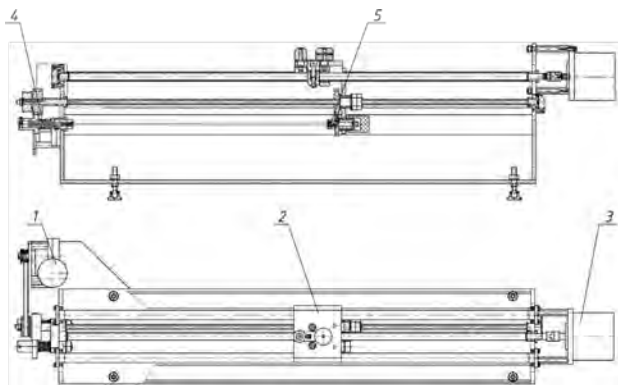


Рисунок 5.14 – Рабочая ванна установки

В рабочую ванну встроены механизм вращения заготовки 1, ТЭН мощностью 3 кВт (не показан), токоподвод (не показан), два температурных датчика (не показаны), траверса 2, механизм продольного перемещения траверсы 3, передний шпиндель 4 и задний шпиндель 5.

Установка заготовки концентратора-инструмента в ванне осуществляется креплением в переднем и заднем шпинделе. Оси шпинделей находятся на глубине 125 мм от поверхности электролита.

Для исключения провисания заготовка натягивается с помощью пружины сжатия, установленной в переднем шпинделе. Поскольку заготовка (концентратор-инструмент) обладает малой жесткостью, то при её осевом вращении в процессе обработки неизбежно скручивание. Для предотвращения скручивания в конструкции ванны применен механизм вращения с равным распределением крутящего момента на передний и задний шпиндели. Механизм осевого вращения заготовки приводится от двигателя постоянного тока, закрепленного на ванне. С помощью цепной передачи крутящий момент от двигателя передается на вал, на котором имеются две шестерни. Крутящий момент с шестерней вала передается на шестерни переднего и заднего шпинделя, обеспечивая вращение заготовки без скручения.

Передний шпиндель (рисунок 5.15) предназначен для крепления, вращения и натяжения заготовки в процессе обработки. Также в переднем шпинделе устанавливаются уплотняющие элементы.

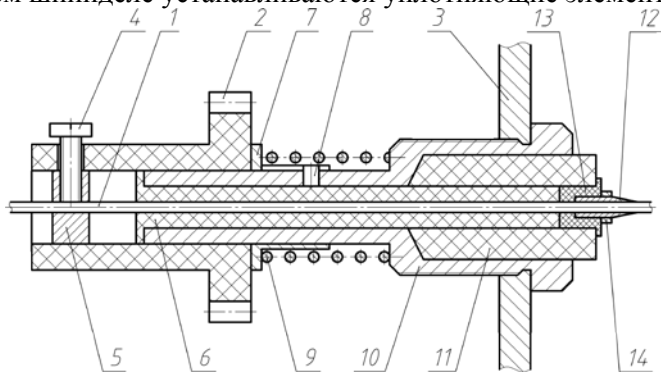


Рисунок 5.15 – Передний шпиндель

Несущим элементом переднего шпинделя является ось 10, имеющая резьбовую часть, с помощью которой шпиндель монтируется на боковой стенке ванны 3. На гладкую поверхность оси устанавливается шестерня 2, изготовленная из капролона. Шестерня свободно перемещается вдоль оси. Соединение заготовки 1 с шестерней осу-

ществляется с помощью втулки 4 и винта 5. Натяжение заготовки в процессе обработки осуществляется с помощью пружины 9, установленной между шестерней и опорной поверхностью оси.

Для предотвращения осевого вращения пружины в результате вращения шестерни устанавливается втулка 7. Втулка имеет продольный паз, который совмещается со штифтом 8, запрессованном на поверхности оси. Такая конструкция обеспечивает свободное перемещение втулки 7 вдоль оси и возможность сжатия пружины, но предотвращает осевое вращение. Для надежной изоляции заготовки-анода от оси-катода установлена фторопластовая втулка 11.

Уплотнение переднего шпинделя от протекания электролита выполняется с помощью фторопластовой втулки 6, которая запрессовывается в отверстие оси. Уплотнение зоны формирования плавного перехода осуществляется запрессовыванием сменной фторопластовой втулки 13. Технологическая втулка 12 обжимается на заготовке и свободно вращается при обработке во втулке 13. При использовании составной технологической втулки её фиксация на поверхности заготовки производится запрессовыванием и обжимом кольца 14.

Задний шпиндель служит для крепления и вращения заготовки (рисунок 5.16).

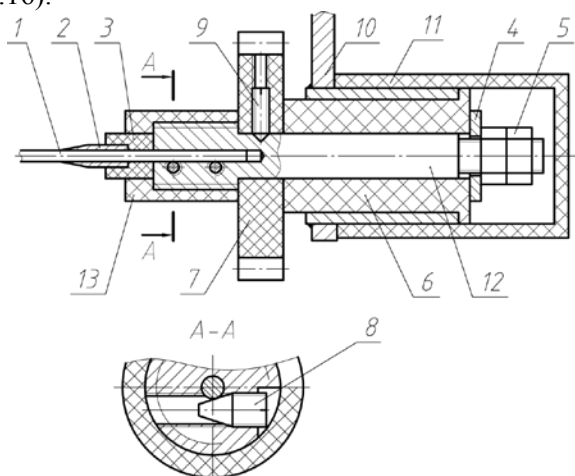


Рисунок 5.16 – Задний шпиндель

Основным элементом заднего шпинделя является вал 12. В торце вала имеется осевое отверстие для введения заготовки 1. Фиксация заготовки осуществляется путем её заклинивания с помощью двух винтов 8. Для защиты узла крепления заготовки от обработки используется защитный колпачок 13, изготовленный из фторопласта.

Крепление шестерни 7 к валу осуществляется с помощью трех винтов 9. Задний шпиндель соединяется с траверсой ванны 10 через запрессованную изоляционную втулку 6, изготовленную из фторопласта. Вал фиксируется во втулке 6 шайбой 4 и двумя гайками 5. Хвостовая часть вала защищается от обработки фторопластовым колпачком 11.

Для поддержания постоянного уровня электролита в конструкции ванны предусмотрен переливной карман. В процессе обработки с помощью циркуляционного насоса осуществляется постоянная прокачка электролита из бака в ванну с целью выравнивания температуры по объему ванны. Лишний электролит через переливной карман стекает в бак. Гидравлическая схема установки приведена на рисунке 5.17.

Перед началом работы ванна и бак заполняются электролитом. Заполнение бака происходит за счет стекания электролита из ванны через вентиль ВН1. Бак заполняется до срабатывания датчика уровня электролита. После заполнения бака вентиль ВН1 перекрывается и ванна заполняется электролитом до уровня, расположенного на 10 мм ниже уровня заготовки. Прокачка электролита через рабочую ванну осуществляется циркуляционным насосом Н1.

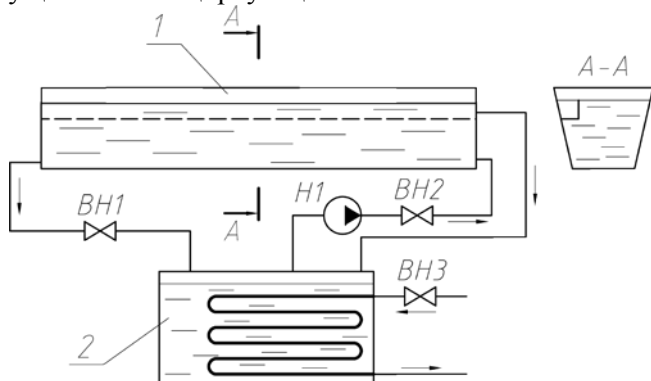


Рисунок 5.17 – Гидравлическая схема установки

С помощью вентиля ВН2 производится регулировка напора насоса с таким условием, чтобы объем электролита, подаваемого из бака, успевал стекать в сливное отверстие переливного кармана, т.е. чтобы электролит не поднимался выше уровня переливного кармана. В баке расположен теплообменник системы охлаждения электролита, изготовленный в виде змеевика и подключенный к водопроводной системе. Подача охлаждающей воды в теплообменник осуществляется при срабатывании магнитного клапана ВН3.

Управление установкой осуществляется персональным компьютером с помощью специально разработанной программы, интерфейс которой представляет собой виртуальную панель управления (рисунок 5.18). Программа через блок управления установки обеспечивает управление насосом, механизмом осевого вращения заготовки, механизмом продольного перемещения траверсы, включением рабочего напряжения. Кроме того, программа осуществляет контроль и поддержание температуры электролита.

Включение установки производится переключением тумблера «Power» в положение «On». На двух дисплеях «Temperature» при этом отображаются данные о значениях температур с датчиков, расположенных в ванне. Циркуляционный насос включается переключением тумблера «Pump» в положение «On».

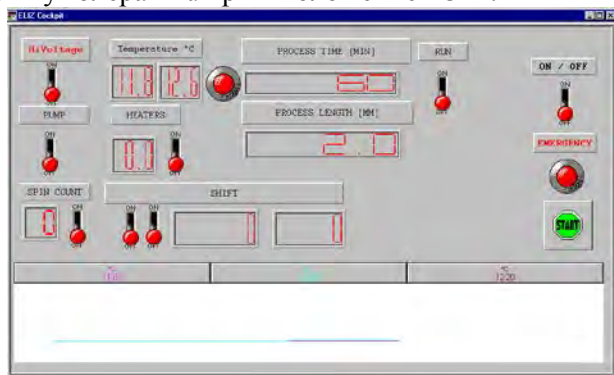


Рисунок 5.18 – Интерфейс программы для управления установкой

В поле «HEATERS» заносится значение температуры, до которой необходимо предварительно разогреть электролит. Для включения нагрева тумблер «HEATERS» необходимо переключить в по-

ложение «On». При этом включаются оба ТЭНа: в рабочей ванне (3 кВт) и в баке (1,5 кВт). По достижении заданной температуры ТЭНы отключаются. Механизм осевого вращения заготовки включается переключением тумблера «Spin» в положение «On».

Включение рабочего напряжения осуществляется с помощью тумблера «High voltage». При этом программа переходит в режим термостатирования электролита. В этом режиме при увеличении температуры на 2 °С относительно номинального значения открывается магнитный клапан теплообменника и происходит охлаждение электролита, а при снижении температуры на 2 °С включается подогрев электролита. Причем подогрев осуществляется только с помощью ТЭНа, расположенного в баке. Это позволяет избежать возможного влияния температурных потоков от ТЭНа, расположенного в рабочей ванне под заготовкой, на равномерность размерного съема.

Продолжительность обработки задается в поле «Timer». По истечении заданного времени программа отключит рабочее напряжение.

При низкой температуре электролита возможен перегрев заготовки в результате теплового действия тока при его предельных плотностях, а также подгорание токоподводящих поверхностей заготовки из-за срыва процесса обработки. Для предотвращения этого программа не позволяет включить рабочее напряжение при температуре электролита ниже 60 °С.

Общий вид установки для изготовления концентраторов-инструментов (без источника питания) приведен на рисунке 5.19.



Рисунок 5.19 – Установка для изготовления концентраторов-инструментов

Концентраторы-инструменты, изготовленные с применением разработанного оборудования, представлены на рисунке 5.20.

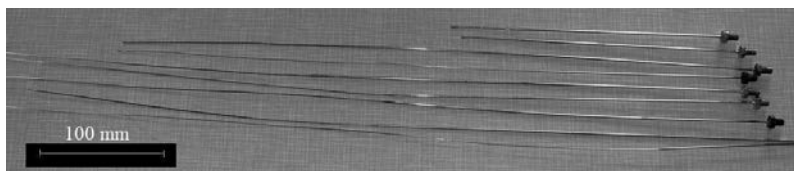


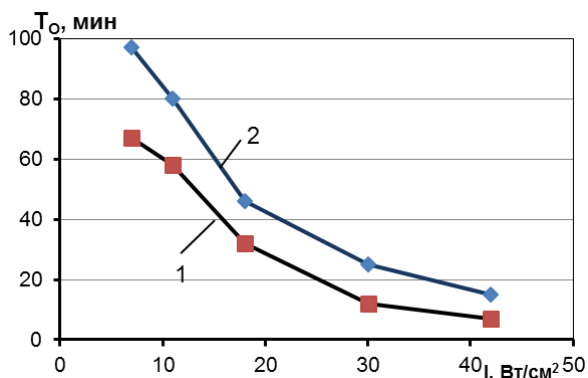
Рисунок 5.20 – Концентраторы-инструменты, изготовленные с применением разработанного оборудования

5.3 Эксплуатационные испытания концентраторов-инструментов

Определение прочностных характеристик концентраторов-инструментов проводилось путем измерения продолжительности непрерывной работы до их разрушения при различных значениях интенсивности ультразвукового излучения. Согласно требованиям технических условий ТУ ВУ 100232486.013–2007 «Инструменты-волноводы для ультразвуковой ангиопластики» концентраторы-инструменты должны выдерживать не менее 10 мин непрерывной работы в резонансе при интенсивности 42 Вт/см^2 . Продолжительность непрерывной работы до разрушения концентраторов-инструментов является, по сути, средней наработкой на отказ T_0 (один из показателей надежности). При испытаниях интенсивность ультразвукового излучения соответствовала значениям 7, 11, 18, 30 и 42 Вт/см^2 .

Испытаниям подвергались концентраторы-инструменты, полученные по разработанной технологии, и концентраторы-инструменты, полученные шлифованием из цилиндрической заготовки в состоянии поставки. Для каждого значения интенсивности проводилось по три измерения.

Экспериментальные зависимости, характеризующие изменение продолжительности работы концентраторов-инструментов до разрушения при различных значениях интенсивности излучения, представлены на рисунке 5.21.



1 – концентратор-инструмент, полученный шлифованием; 2 – концентратор-инструмент, полученный по разработанной технологии

Рисунок 5.21 – Изменение средней наработки концентраторов-инструментов на отказ до разрушения при различных значениях интенсивности излучения

Из представленных зависимостей видно, что надежность концентраторов-инструментов, полученных по разработанной технологии, выше на 31–53 %, чем концентраторов-инструментов, полученных шлифованием. Повышение надежности концентраторов-инструментов связано с использованием заготовки, имеющей повышенный предел выносливости за счет применения промежуточной ЭПО между проходами волочения. Кроме того, повышение надежности достигается за счет обеспечения плавности переходов между ступенями волочения в соответствии с заданной формой, а также за счет обеспечения высокого качества поверхности при формообразовании методом размерной ЭПО.

Оценка акустических характеристик проводилась путем измерения амплитуды продольных колебаний рабочего наконечника концентратора-инструмента, полученных по разработанной технологии. Амплитуда продольных колебаний является одной из основных акустических характеристик. При ультразвуковом разрушении тромбов амплитуда продольных колебаний оказывает значительное влияние на эффективность выполнения данной процедуры (с повышением амплитуды эффективность возрастает) [39].

Для регистрации амплитуды продольных колебаний использовался комплекс, включающий лазерный интерферометр Polytec OFV-512 и анализатор вибраций Polytec OFV-5000. Измерения про-

водились для партии, включающей 10 концентраторов-инструментов различных типоразмеров. В качестве примера на рисунке 5.22 представлена зависимость, характеризующая изменение амплитуды продольных колебаний рабочего наконечника концентратора-инструмента при изменении частоты.

В результате испытаний партии концентраторов-инструментов установлено, что максимальное значение амплитуды продольных колебаний их рабочего наконечника при резонансной частоте находится в диапазоне от 30 до 42 мкм. Согласно [39] такие значения амплитуды позволяют выполнять эффективное воздействие на тромбы без разрушения концентраторов-инструментов.

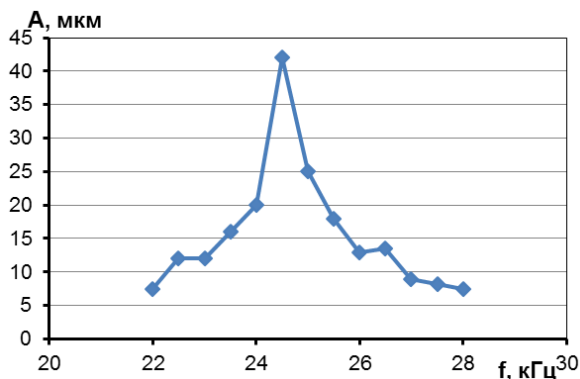


Рисунок 5.22 – Амплитуда продольных колебаний рабочего наконечника при различных значениях частоты

5.4 Применение концентраторов-инструментов в медицинской практике

Разработанные технологические процессы и оборудование внедрены на Государственном предприятии «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» для производства ультразвуковых ступенчатых концентраторов-инструментов для внутрисосудистого разрушения тромбов. На предприятии организован участок по производству концентраторов-инструментов.

По результатам изготовления и предварительных испытаний опытной партии концентраторов-инструментов разработаны и подготовлены к регистрации технические условия ТУ ВУ 100232486.013–2007 на изделие «Инструменты-волноводы для ультразвуковой ангиопластики».

По заключению гигиенической экспертизы установлено, что концентраторы-инструменты по санитарно-химическим, органолептическим и токсикологическим показателям соответствуют требованиям действующих нормативных и правовых актов (акт №941-10/3-13-1-6 от 09.03.2006 г. выдан ГУ «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья»). В результате технических испытаний на базе ГНУ «Институт порошковой металлургии» установлено, что по техническим характеристикам концентраторы-инструменты соответствуют требованиям, предъявляемым к медицинским инструментам и изделиям медицинского назначения (Акт о проведении технических испытаний №3589 от 20.02.2006 г.).

По результатам проведенных технических и санитарно-гигиенических испытаний концентраторов-инструментов получено разрешение на проведение клинических испытаний. Комитетом по медицинской технике Министерства здравоохранения Республики Беларусь были определены следующие клинические базы для проведения испытаний: РНПЦ «Кардиология»; Минская областная клиническая больница; Республиканская больница УД Президента Республики Беларусь. Клинические испытания проведены на базе ангиографических отделений указанных медицинских учреждений на 11 пациентах-добровольцах с различными степенями поражения периферических и брахиоцефальных артерий (рисунок 5.23). Во всех случаях применения концентраторов-инструментов наблюдалось эффективное высокоинтенсивное удаление тромбов без перфорации сосудистой стенки. В процессе испытаний не было выявлено недостатков конструкции и свойств концентраторов-инструментов.

На основании положительных результатов проведенных государственных испытаний и получено регистрационное удостоверение № ИМ-7.93118/1003, разрешающее производство концентраторов-инструментов и их применение в медицинской практике.

С 2007 г. по настоящее время Государственным предприятием «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» ежегодно производится и поставляется в клиники Республики Беларусь 250-300 единиц ультразвуковых концентраторов-инструментов.



Рисунок 5.23 – Испытания концентраторов-инструментов в Республиканской больнице УД Президента Республики Беларусь

ГЛАВА 6

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

В Белорусском национальном техническом университете и на Государственном предприятии «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» под руководством А.Э. Паршуты разработан ряд установок для ЭПО, обеспечивающих размерную обработку, удаление заусенцев, полирование, очистку поверхности изделий из различных металлических материалов, включая коррозионно-стойкие и углеродистые стали, медные, алюминиевые, никелевые и титановые сплавы, нитинол. Оборудование предназначено как для учебных и исследовательских целей, так и для применения в промышленности. Разработанное оборудование используется для обработки изделий сложной формы, видовых деталей машин и приборов, коррозионно-стойких деталей химического оборудования, медицинского инструментария: хирургического, стоматологического, имплантантов, металлических зубных протезов, элементов брикет систем, искусственных клапанов сердца, деталей оборудования пищевой промышленности, бытовых изделий, бижутерии, корпусов часов, браслетов, элементов спортивных тренажеров, мебельной фурнитуры. Мощность разработанного оборудования в зависимости от его назначения и серийности производства составляет от 3 до 250 кВт. Ниже приведены примеры разработанного оборудования для ЭПО.

6.1 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–1.042

Установка ЭРОМ–1.042 предназначена для полировки носика распылителя методом электролитно-плазменной обработки с целью повышения долговечности распылителя при его эксплуатации.

Установка ЭРОМ–1.042 представляет собой 6-позиционный автомат карусельного типа и циклического действия. Все технологические операции: загрузка, выгрузка, обработка, мойка, пассивация и сушка полностью автоматизированы. Установка ЭРОМ–1.042

(рисунок 6.1) состоит из следующих основных узлов: каркаса 1, крышки 2, поворотной головки 3, транспортёра 4, механизма загрузки 5, подвески 6, ванны обработки 7, бака для электролита 8, ванн 7, кассет 10, калориферов 11, бака пассивации 12, гидростанции 13, электрооборудования 14, выпрямителя 15. Каркас 1, сварен из швеллеров, проемы которого закрыты дверками и щитками, является основной несущей конструкцией. Внутри его размещаются бак 8 для электролита и бак пассивации 12.

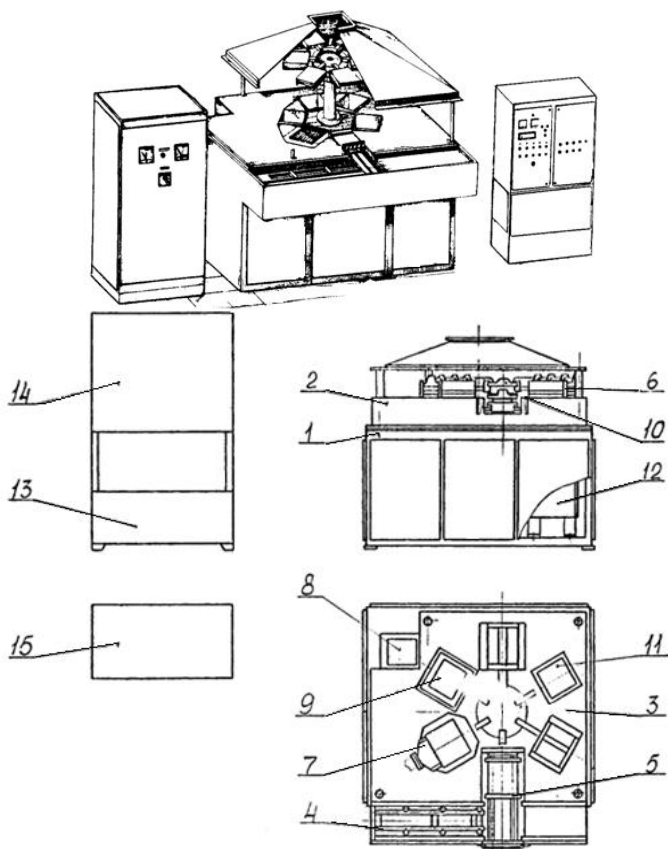


Рисунок 6.1 – Установка электролитно-плазменной обработки ЭРОМ-1.042

Принцип работы установки состоит в следующем. В исходном положении головка поворотная 3 находится внизу. Все шесть кассет навешаны на подвески 6 и находятся на соответствующих позициях. В ванне обработки 9 происходит обработка деталей, а на остальных позициях происходит промывка, пассивация и сушка соответственно. В это время механизм загрузки 5 захватывает с подвески 6 кассету и перемещает ее в линию транспортера 4. Транспортер 4 перемещает кассету с необработанными деталями, а кассету с обработанными деталями сталкивает по направляющим вправо. Механизм загрузки 5 после возврата транспортера 4 в исходное положение навешивает кассету на подвеску 6 поворотной головки 3. По истечении времени обработки срабатывают электромагнитные клапаны и один из них отсекает насосную установку от ванны обработки, а другой соединяет ее (ванну) со сливом. Отключается подача технологического тока, после чего поворотная головка совершает подъем, поворот и опускание всех шести кассет на следующую позицию. В ванну обработки сначала подается электролит, затем включается технологический ток и цикл повторяется.

6.2 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–10

Установка ЭРОМ–10 предназначена для ЭПО при ремонте деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей с целью повышения их долговечности при эксплуатации.



Рисунок 6.2 – Установка ЭРОМ–10

Таблица 6.1 – Технические характеристики установки ЭРОМ–10

Характеристика	Значение
Производительность (при обработке распылителей), шт/ч	не менее 240
Продолжительность цикла обработки, с	45–120
Напряжение сети, В	380/220
Рабочий ток, А	до 150
Рабочее напряжение, В	50–280
Потребляемая мощность, кВт	до 40
Рабочая температура электролита, °С	20– 90
Расход воды для охлаждения, м ³ /ч	0,8
Габаритные размеры:	
длина, мм	1200
ширина, мм	1100
высота, мм	1650

Установка представляет собой двухкассетную ванну циклического действия. Загрузка и выгрузка обрабатываемых деталей осуществляется вручную, обработка производится в автоматическом режиме.

Установка ЭРОМ–10 состоит из следующих составных узлов: ванны обработки, бака для электролита, насоса, источника питания и пульта управления. Обработка изделий на установке производится в ванне обработки. Электролит в ванну поступает при помощи насоса из бака для электролита. Подвод отрицательного полюса источника питания производится к неподвижному контакту, расположенного на внешней стороне ванны обработки. Для удаления испарений около ванны крепится вытяжка.

Устройство токоподвода крепится на ванне обработки и служит для подвода технологического тока к обрабатываемым изделиям. Подача технологического тока осуществляется с источника питания постоянного тока.

Управление установкой производится с помощью органов управления расположенных на панели пульта. Для включения и выключения электропитания установки на боковой стенке шкафа установлен автоматический выключатель, при включении которого

напряжение подается на пульт управления и источник питания, о чем сигнализирует лампа на панели.

На панели пульта управления расположен вольтметр и амперметр, для измерения напряжения и тока обработки, милливольтметр контролирует температуру электролита. Тумблер "Нагрев электролита" включает и выключает ТЭНы в баке электролита. Тумблер управляет насосом электролита. Кнопочный выключатель "Общий стоп" экстренно снимает напряжение с установки.

6.3 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ-114

Область применения:

- полирование и снятие заусенцев с деталей из нержавеющей, низкоуглеродистых сталей и латуни с площадью обрабатываемой поверхности – до 750 см²;
- снижение шероховатости обрабатываемой поверхности на 2 – 3 класса до $Ra = 0,2-0,12$ мкм;
- снятие заусенцев 0,5–0,1 мм.

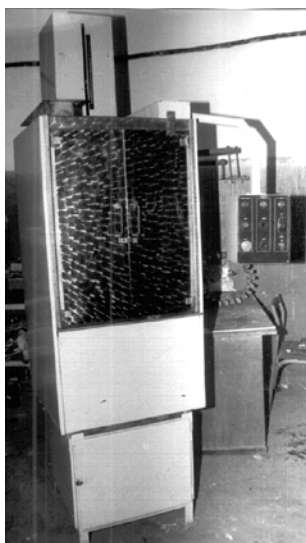


Рисунок 6.3 – Внешний вид установки ЭРОМ-114

Таблица 6.2 – Технические характеристики установки ЭРОМ–114

Характеристика	Значение
Производительность, м ² /ч	не менее 0,6
Продолжительность цикла обработки, с	180-360
Напряжение сети, В	380/220
Рабочий ток, А	180-200
Рабочее напряжение, В	250
Потребляемая мощность, кВт	до 45
Количество источников питания типа ДЕЗ 315/230, шт.	1
Рабочая температура электролита, °С	80–90
Расход воды для охлаждения, м ³ /ч	0,8
Производительность вытяжной вентиляции, м ³ /ч	800
Габаритные размеры:	
длина, мм	800
ширина, мм	950
высота, мм	2200

Установка электролитно-плазменной обработки для полирования металлических изделий состоит из следующих основных узлов: ванны обработки, каркаса, бортового отсоса, подвески и электрооборудования на источнике питания типа ДЕЗ 315/230.

Загрузка и выгрузка обрабатываемых деталей осуществляется вручную, обработка производится в автоматическом режиме.

Ванна обработки является основным несущим элементом конструкции. Рабочий объем ванны составляет 0,1 м³, она имеет водяную рубашку для охлаждения электролита. На верхней плоскости ванны закреплен каркас, сваренный из уголков. Боковые проемы каркаса закрыты стенками. Передний проем закрывается дверями, закрывающими доступ внутрь во время обработки. Сверху каркас закрыт крышкой, имеющей фланец для присоединения к вытяжной вентиляции. Внутри каркаса на направляющих втулках установлен шток, с помощью которого осуществляется вертикальное перемещение подвески с токоподводом. Приводом перемещения подвески служит гидроцилиндр, подключенный к автономной гидростанции. Перемещением гидроцилиндра управляют кнопками с пульта

управления, размещенного на каркасе установки. На подвеске закрепляются кассеты с обрабатываемыми заготовками. Управление выдержкой времени обработки возможно как в ручном, так и автоматическом режиме.

Температура электролита в ванне обработки регулируется подачей охлаждающей воды, протекающей через рубашку охлаждения ванны.

6.4 Комплекс для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–11–12

Комплекс ЭРОМ–11–12 предназначен для электролитно-плазменной полировки и очистки носика распылителей дизельной форсунки с целью повышения их долговечности при эксплуатации.



Рисунок 6.4 – Комплекс для электролитно-плазменной обработки носика распылителя ЭРОМ–11–12

Таблица 6.3 – Технические характеристики установки ЭРОМ–11

Характеристика	Значение
Производительность (при обработке распылителей), шт/ч	не менее 240
Продолжительность цикла обработки, с	30–120
Напряжение сети, В	380/220
Рабочий ток, А	до 150
Рабочее напряжение, В	260
Потребляемая мощность, кВт	до 40
Рабочая температура электролита, °С	20–45
Расход воды для охлаждения, м ³ /ч	0,8
Габаритные размеры: длина, мм ширина, мм высота, мм	1200 1100 1650

Таблица 6.4 – Технические характеристики установки ЭРОМ–12

Характеристика	Значение
Производительность (при обработке распылителей), шт/ч	не менее 240
Продолжительность цикла обработки, с	10–30
Напряжение сети, В	380/220
Рабочий ток, А	до 200
Рабочее напряжение, В	260
Потребляемая мощность, кВт	до 52
Рабочая температура электролита, °С	70–85
Расход воды для охлаждения, м ³ /ч	0,1
Габаритные размеры: длина, мм ширина, мм высота, мм	1200 770 1550

Система соединений трубопроводов циркуляции электролита и системы охлаждения включает в себя следующие элементы (рисунок 6.5):

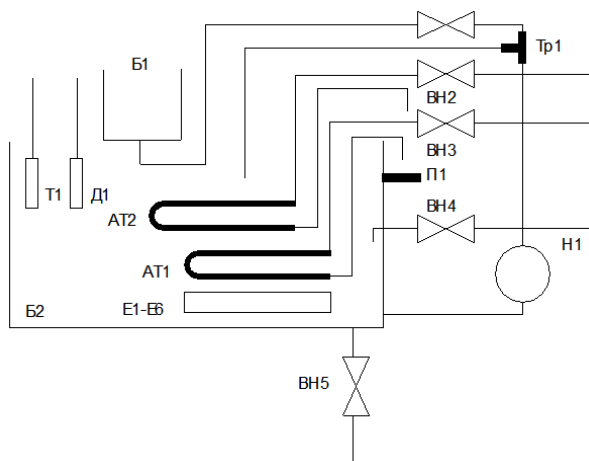


Рисунок 6.5 – Гидравлическая схема установки ЭРОМ–11–12

Б1 – ванна обработки;

Б2 – бак с электролитом;

АТ1-АТ2 – теплообменники бака электролита;

ВН1 – вентиль подачи электролита из бака в ванну обработки;

ВН2 – ВН3 - вентили подачи воды в теплообменники бака для электролита;

ВН4 – вентиль подачи воды в бак для электролита;

ВН5 – вентиль слива электролита из бака;

Д1 – датчик уровня электролита в баке;

Т1 – термометр измерения температуры электролита;

Н1 – насос электролита;

Е1-Е6 – нагреватели электролита.

Тр1 – байпасный тройник;

П1 – переливной патрубков.

Гидрочасть работает следующим образом. Перед началом работы сухое вещество электролита засыпается в Б2 – бак электролита. Открывается вентиль ВН4 и происходит заполнение бака Б2. О достижении нужного уровня воды сигнализирует датчик Д1. Перед обработкой включаются нагреватели Е1-Е6 в баке электролита Б2. Контроль температуры осуществляется термодатчиком Т1. Регулирование температуры производят теплообменниками АТ1-АТ2 с вентилями ВН2 и ВН3. Включается насос Н1 и электролит поступа-

ет в ванну обработки Б1 и самотеком стекает в бак Б2. При этом часть электролита через байпасный тройник Тр1 отводится непосредственно в бак Б2, осуществляя при этом перемешивание электролита в нем. Для слива электролита при его полной замене открывается вентиль ВН5.

6.5 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–17

Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–17 предназначена для обработки металлических изделий, изготовленных из сталей и сплавов алюминия и меди.

Установка должна эксплуатироваться в закрытом помещении, отвечающем следующим требованиям:

- 1) температура воздуха 20–25 °С;
- 2) наличие электроэнергии напряжением 380 В и частотой сети 50–60 Гц;
- 3) наличие оборотного, городского водопровода и канализации;
- 4) наличие сжатого воздуха давлением 0,3–0,5 МПа;
- 5) наличие системы вытяжной вентиляции.



Рисунок – 6.6 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–17

Таблица 6.5 – Технические характеристики установки ЭРОМ–17

Характеристика	Значение
Производительность, м ² /ч	не менее 1
Продолжительность цикла обработки, с	60–720
Напряжение сети, В	380
Рабочий ток, А	350–400
Рабочее напряжение, В	300
Потребляемая мощность, кВт	до 120
Количество источников питания Р=150 кВА	1
Рабочая температура электролита, °С	80–95
Объем ванны, л	1500
Расход воды для охлаждения, м ³ /ч	до 2
Расход сжатого воздуха, м ³ /ч	1,8
Производительность вытяжной вентиляции, м ³ /ч	800
Габаритные размеры бака (ориентировочно): длина, мм ширина, мм высота, мм	2188 1360 1824

Гидравлическая часть установки для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–17 состоит из следующих составных частей:

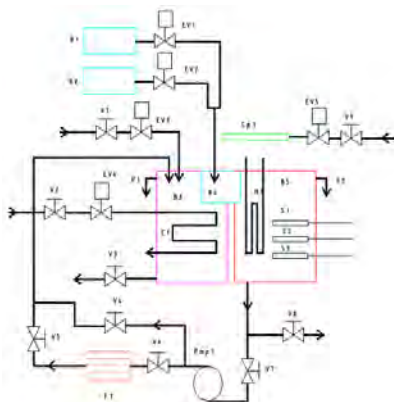


Рисунок 6.7 – Гидравлическая часть установки для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–17

В1 – бак с кислотным корректирующим раствором;
В2 – бак со щелочным корректирующим раствором;
В3 – бак для оперативного запаса электролита;
В4 – бак для смешивания корректировочных растворов;
В5 – рабочая ванна;
EV1 – э/м клапан подачи кислотного корректировочного раствора;
EV2 – э/м клапан подачи щелочного корректировочного раствора;
EV3 – э/м клапан долива воды в бак В3;
EV4 – э/м клапан подачи воды в систему охлаждения электролита;
EV5 – э/м клапан подачи воды в промывочный спрейер;
С1 – змеевик системы охлаждения электролита;
Н1 – электрический нагреватель электролита в рабочей ванне;
Р1 – переливная труба бака В3;
Р2 – переливная труба рабочей ванны;
V1 – вентиль долива воды;
V2 – вентиль системы охлаждения;
V3 – вентиль слива отработанного электролита;
V4 – байпасный вентиль фильтра очистки;
V5, V6 – вентили отключения фильтра очистки;
V7 – вентиль регулировки подачи насоса;
V8 – вентиль слива отработанного электролита из ванны обработки;
V9 – вентиль регулировки подачи воды при промывки;
F1 – фильтр очистки электролита;
Pmp 1 – насос прокачки электролита;
Sp1 – спрейер для промывки деталей при их извлечении из электролита;
S1 – датчик температуры электролита в рабочей ванне;
S2 – датчик уровня электролита в рабочей ванне;
S3 – датчик рН электролита в баке для смешивания корректировочных растворов.

Гидравлическая часть установки работает следующим образом. При первичном заполнении электролитом, его сухие ингредиенты

засыпаются в рабочую ванну В5. Технологическая вода через вентили V2 и EV4 подается в бак В3 и через порог водослива заполняет корректировочный бак В4, из которого переливается в рабочую ванну В5. По достижении нужного уровня электролита в рабочей ванне В5, срабатывает датчик S2 и долив воды прекращается. После этого включается нагреватель Н1 и насос Pmp1. Вентили V5 и V6 запираются и электролит прокачивается насосом Pmp1 через баки В3, В4 и В5 до полного растворения сухого вещества электролита. После этого вентили V4-V7 настраиваются на оптимальный режим прокачки электролита через фильтр. В случае аварийной подачи воды в баки В3 и В5, слив избытка электролита происходит через переливные трубы P1 и P2. При превышении температуры электролита в ванне обработки В5, датчик S1 подает команду на э/м клапан EV4 для подачи охлаждающей воды в систему охлаждения С1 и отключение нагревателя Н1. При снижении уровня электролита в рабочей ванне В5 ниже рабочего уровня, датчик S2 подает команду на э/м клапан EV3 для долива воды в бак В3. При изменении значения рН в рабочей ванне В5 в ту или иную сторону, включаются э/м клапаны EV1 и EV2 и происходит коррекция значения рН. При извлечении обработанных деталей из электролита, смыв его остатков с их поверхности осуществляет спрейер Sp1. Синхронизация подачи промывочной воды в спрейер осуществляется датчиком положения подвески с деталями в приводе перемещения подвески.

Установка представляет собой моноблочную конструкцию с прокачиванием электролита через рабочую зону. Загрузка и выгрузка обрабатываемых деталей осуществляется вручную, обработка производится в автоматическом режиме.

Основным функциональным и несущим элементом установки ЭРОМ–17 является бак, состоящий из ванн – рабочей, оперативного запаса электролита и ванны коррекции электролита. Объем рабочей ванны составляет 490 л, ванны оперативного запаса – 920 л и ванны коррекции – 33 л. Обработка деталей происходит в рабочей ванне, охлаждение и очистка электролита от шлама осуществляется в ванне оперативного запаса, добавление корректирующих растворов производится из ванны коррекции. Прокачивание электролита через систему ванн обеспечивается выносным насосом, укомплектованным тканевым фильтром.

Верхняя часть бака закрыта крышкой, на которой расположены: кожух рабочей зоны, привод подъема-опускания деталей в электролит, баки коррекции состава электролита, короба для установки датчиков и электронагревателей и короб для подключения электрических частей установки к источнику питания и пульту управления.

Охлаждение электролита производится из оборотной заводской системы и обеспечивается двумя трубчатыми змеевиками с общей площадью $0,7 \text{ м}^2$, установленными в ванне оперативного запаса.

Для независимого, от общей прокачки электролита, охлаждения и перемешивания электролита в рабочей ванне предусмотрены пневматический барботер с системой направления потока электролита и охладитель коробчатого типа, площадью $0,74 \text{ м}^2$. Очистка электролита от взвешенного шлама происходит в ванне оперативного запаса, с помощью жалюзи с неподвижными створками, установленных вблизи дна этой ванны.

Подача охлаждающей воды в змеевики и в охладитель и сжатого воздуха в барботер производится температурным контроллером.

Поддержание необходимого уровня электролита в рабочей ванне осуществляется подачей воды из городского водопровода контроллером уровня. Долив воды производится отдельно в рабочую ванну и в ванну оперативного запаса через электромагнитные клапаны. Первоначальное заполнение водой всей установки производится через ручной вентиль, установленный на задней стенке бака. В случае необходимости, возможно заполнение водой только рабочей ванны через электромагнитный клапан долива в нее воды. Для образования непрерывного потока электролита в установке использован центробежный насос производительностью до 300 л/мин . Ручной вентиль предназначен для регулирования скорости прокачки электролита при работе установки или для отключения рабочей ванны от ванны оперативного запаса при ее автономном использовании.

Баки, расположенные на крышке бака установки, предназначены для хранения запаса растворов для коррекции электролита. подача корректирующих растворов производится в ванну коррекции через электромагнитные клапаны. Контроль уровня растворов в корректирующих баках осуществляется датчиками уровня.

Установка работает следующим образом. Обрабатываемые детали закрепляются в кассете, которая устанавливается на подвеску.

Для электрической изоляции подвески от корпуса установки применены изоляторы. Подъем и опускание подвески при обработке производится приводом на пневмоцилиндре, укомплектованным двумя датчиками положения.

Для исключения поражения электрическим током при работе установки служит кожух с поднимающейся дверью, которая управляет контактами, блокирующими подачу рабочего напряжения на подвеску при открытой двери.

Продолжительность времени обработки задается таймером.

Вентиляция рабочей зоны установки производится через вентиляционный канал в верхней части кожуха. Приток воздуха в рабочую зону осуществляется через щель в нижней части двери.

Для предохранения от ожогов о горячие стенки бака на его передней и боковых стенках расположены панели из стеклотекстолита.

Электрооборудование установки электролитно-плазменной обработки предназначено для подключения к 3-х фазной сети переменного тока напряжением 380 В.

Питание ванны обработки технологическим током осуществляется от выпрямителя мощностью 150 кВА, с рабочим напряжением 300 В и током нагрузки до 400 А.

6.6 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ-5

Область применения:

- полирование и снятие заусенцев с деталей из нержавеющей, низкоуглеродистых сталей и латуни с площадью обрабатываемой поверхности – до 1200 см²;
- снижение шероховатости обрабатываемой поверхности на 2–3 класса, до Ra = 0,2–0,12 мкм;
- снятие заусенцев 0,5–0,1 мм.

Установка должна эксплуатироваться в закрытом помещении, отвечающем следующим требованиям:

- 1) температура воздуха 16–20 °С;
- 2) наличие электроэнергии напряжением 380 В, частотой 50 Гц;
- 3) наличие водопровода и канализации;

- 4) наличие сжатого воздуха давлением 0,3–0,5 МПа;
- 5) наличие системы вытяжной вентиляции.

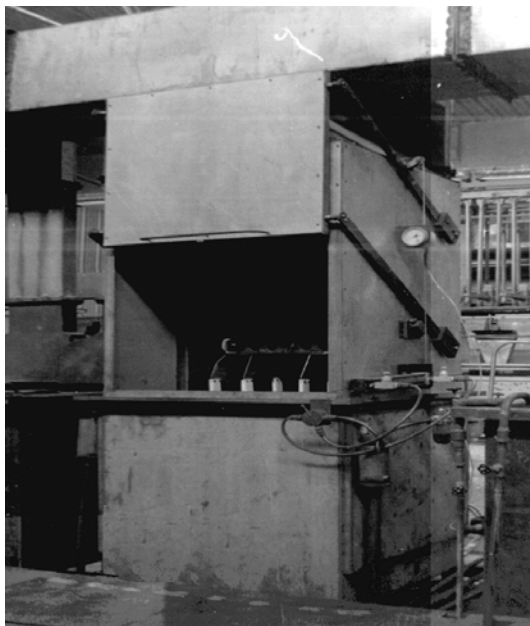


Рисунок 6.8 – Внешний вид установки ЭРОМ-5

Таблица 6.6 – Технические характеристики установки ЭРОМ-5

Характеристика	Значение
Производительность, м ² /ч	не менее 1,0
Продолжительность цикла обработки, с	180–360
Напряжение сети, В	380/220
Рабочий ток, А	220–250
Рабочее напряжение, В	250
Потребляемая мощность, кВт	до 60
Количество источников питания типа ДЕЗ 315/230, шт.	1
Рабочая температура электролита, °С	80–95
Объем ванны, л	900
Расход воды для охлаждения, м ³ /ч	0,8

Продолжение таблицы 6.6

Рабочая температура электролита, °С	80–90
Расход сжатого воздуха, м ³ /ч	0,8
Производительность вытяжной вентиляции, м ³ /ч	800
Габаритные размеры:	
длина, мм	1200
ширина, мм	1550
высота, мм	2700

Установка электролитно-плазменной обработки для полирования металлических изделий ЭРОМ–5 состоит из следующих основных узлов: ванны обработки, каркаса, рамы, крышки, бортового отсоса, подвески, электрооборудования на источнике питания типа ДЭС 315/230.

Загрузка и выгрузка обрабатываемых деталей осуществляется вручную, обработка производится в автоматическом режиме.

Ванна обработки является основным несущим элементом конструкции. Рабочий объем ванны составляет 0,9 м³, она имеет водяную рубашку для охлаждения электролита и барботер для перемешивания электролита. На верхней плоскости ванны закреплен каркас, сваренный из уголков. Боковые проемы каркаса закрыты стенками, задний бортовой отсос предназначен для отвода пара в систему вытяжной вентиляции. Передний проем закрывается подвижной рамой, выполняющей роль двери, закрывающей доступ внутрь во время обработки. Рама уравновешена грузами, закрепленными на поворотных рычагах. Крайнее нижнее положение двери контролируется конечным выключателем. Сверху каркас закрыт крышкой, имеющей фланец для присоединения к вытяжной вентиляции. Внутри каркаса на кронштейнах закреплены рычаги, с помощью которых осуществляется вертикальное перемещение подвески с токоподводом.

Приводом перемещения подвески служит пневмоцилиндр, к штоку которого прикреплен канат, связанный через систему блоков с подвеской. Пневмоцилиндр управляется от кранового пневморас-

пределителя. На подвеске закрепляются кассеты с обрабатываемыми деталями.

Принцип работы установки состоит в следующем. Оператор закрепляет обрабатываемые детали на кассете, поднимает уравновешенную грузами дверь в крайнее верхнее положение и фиксирует ее защелкой. Устанавливает кассеты с деталями на подвеску и зажимает их винтами. Подвеска закреплена на изоляторах и соединена с источником технологического тока гибким кабелем. Оператор убирает фиксирующую защелку и опускает дверь вниз, замыкаются контакты конечного выключателя и на обрабатываемые детали подается напряжение.

Поворотом рукоятки кранового распределителя подается сжатый воздух в штоковую полость пневмоцилиндра. Срабатывает пневмоцилиндр и опускает обрабатываемые детали в электролит, находящийся в ванне. Опускание подвески с деталями в электролит можно производить также с помощью ручного привода на штурвале.

Температура электролита регулируется подачей охлаждающей воды, протекающей через рубашку охлаждения ванны.

6.7 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–22

Установка для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–22 предназначена для полирования металлических изделий.

Таблица 6.7 – Технические характеристики установки для электролитно-плазменной обработки ЭРОМ–22

Характеристика	Значение
Производительность, м ² /ч	не менее 2,8
Продолжительность цикла обработки, с	180-600
Напряжение сети, В	380/220
Рабочий ток, А	800
Рабочее напряжение, В	300
Потребляемая мощность, кВт	до 240
Количество источников питания, шт.	1
Рабочая температура электролита, °С	88-95

Продолжение таблицы 6.7

Расход воды для охлаждения, м ³ /ч	7
Габаритные размеры:	
длина, мм	3500
ширина, мм	2150
высота, мм	2800

Установка ЭРОМ–22 для полирования изделий из нержавеющей стали представляет собой один обрабатывающий модуль с баком охлаждения электролита, электрооборудованием, промывочной ванной и источником питания 250 кВА. Загрузка и выгрузка обрабатываемых деталей осуществляется вручную, обработка производится в автоматическом режиме.

Установка ЭРОМ–22 состоит из следующих составных узлов: силового трансформатора, выпрямителя, пульта управления, ванны обработки, насоса, бака охлаждения электролита и ванны промывки.

На ванне обработки 1 (рисунок 6.9), сваренной из нержавеющей стали, расположен кожух 2, предназначенный для защиты персонала от зоны обработки. На верхней крышке кожуха расположен привод перемещения 3 кассеты 4 с обрабатываемыми деталями 5. Ванна обработки является рабочей емкостью, в которой под воздействием электрического тока в среде электролита происходит электролитно-плазменная обработка деталей. Ванна снабжена нагревателями 6, необходимыми для нагревания электролита до рабочей температуры.

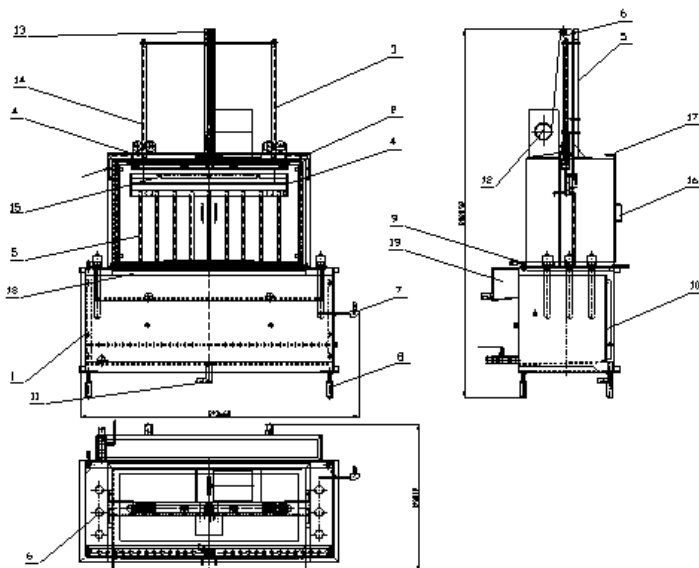


Рисунок 6.9 – Ванна обработки установки ЭРОМ–22

Для измерения температуры электролита на ванне установлен датчик температуры 7. Для обеспечения необходимого гидравлического режима течения электролита в зоне обработки в рабочей ванне установлена перегородка 10. Подача охлажденного электролита производится через патрубок 11. Привод перемещения обеспечивается мотор-редуктором 12 с помощью тросового привода 13 по направляющим 14. С помощью токоподвода 15 к cassette 4 с обрабатываемыми деталями, подается технологическое напряжение. Во время работы кожух закрывается дверями 16 с датчиками закрытия дверей 17. При подаче электролита в ванну его избыток переливается через окно 18 в переливной сборник 19. Окно перелива является вентиляционным отверстием для удаления пара и капель электролита при обработке. Вытяжка подключается к верхней части переливного сборника.

Электролит поступает самотеком в бак охлаждения (рисунок 6.10). Бак выполнен сварным из нержавеющей стали. Для охлаждения горячего электролита, поступающего из ванны обработки через патрубки 1, в нем расположены два охладителя 2. Охлаждающая

вода поступает в них через трубы 3 и сливается через трубы 4. Для интенсификации процесса теплообмена используются две мешалки 5. Охлажденный электролит подается к насосу перекачки через патрубков 6. Автоматический долив воды в бак производится с помощью датчика уровня 7 и электромагнитного клапана 8.

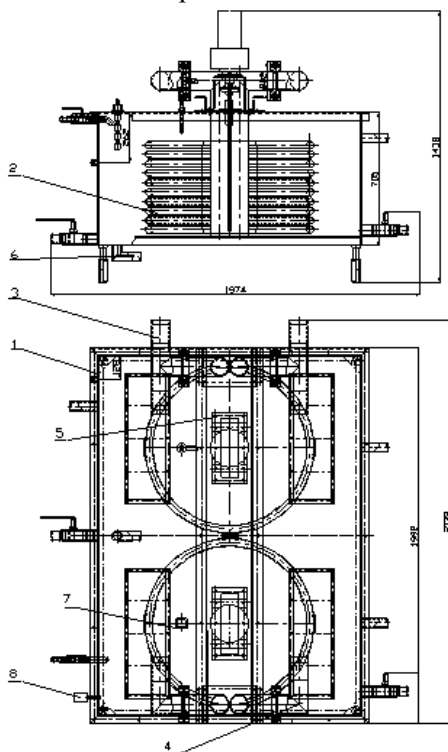


Рисунок 6.10 – Бак охлаждения установки ЭРОМ–22

Кожух с дверями предназначен для защиты обслуживающего персонала от ударов движущимися частями, а также от случайного касания токоведущих частей установки. Он выполнен сварным.

Промывочная ванна для мойки обработанных деталей представляют собой сварную емкость объемом 1 м³.

Электрооборудование и источник питания предназначены для обеспечения технологического процесса обработки деталей, его контроля и управления работой узлов и механизмов установки.

Принцип работы установки состоит в следующем. В исходном положении кассета с обрабатываемыми изделиями находится в верхнем положении и обесточена, двери кожуха открыты. После загрузки двери закрываются, срабатывают датчики на дверях, включается технологическое напряжение и кассета под напряжением опускается в ванну с электролитом. После окончания времени обработки кассета возвращается в исходное положение, напряжение отключается, после чего цикл повторяется.

Управление установкой производится при помощи органов управления, расположенных на пульте управления. Органы управления и сигнализации, расположенные на верхней панели пульта позволяют управлять установкой в наладочном и рабочем режиме, производить подготовительные операции, контролировать процесс работы посредством средств сигнализации и контроля. Основные электроаппараты располагаются внутри выпрямителя на силовой и релейной панелях.

Электрооборудование установки электролитно-плазменной полировки предназначено для подключения к 3-х фазной сети переменного тока напряжением 380 В, 50 Гц.

Питание ванны обработки технологическим током осуществляется от выпрямителя мощностью 250 кВА. Питание цепей управления и сигнализации осуществляется от трансформатора Т1 напряжением 24, 110 и 220 В, 50 Гц. В ванне установлено 6 нагревательных элементов мощностью по 5 кВт каждый элемент. На мешалках установлены мотор-редукторы М3 и М4 типа МРВ 02, мощностью 0,75 кВт, 180 об/мин.

Управление установкой осуществляется с пульта управления. Схемой предусмотрена работа установки в двух режимах: наладочном и полуавтоматическом (рабочий режим) в зависимости от положения переключателя SA1.

Аварийная остановка установки осуществляется нажатием кнопки SB2 "Стоп" с грибовидным толкателем.

Система соединений трубопроводов циркуляции электролита и воды для охлаждения представлена на рисунке 6.11.

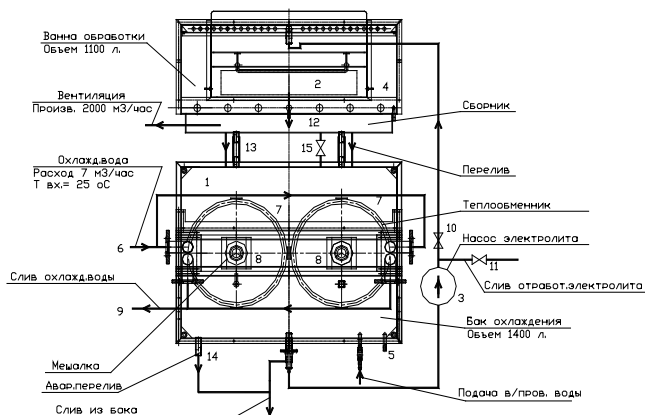


Рисунок 6.11 – Система соединений трубопроводов циркуляции электролита и воды установки ЭРОМ–22

Система работает следующим образом. При первоначальном пуске в бак 1 заливается вода, а в ванну 2 обрабатывается сухое вещество электролита и включаются насос перекачки электролита 3. После полного растворения сухого вещества, включают ТЭН нагревателя 4 и электролит нагревается до нужной температуры. Автоматическое поддержание уровня электролита обеспечивается электромагнитным клапаном 5. Для поддержания заданной температуры электролита вода по трубопроводу 6 из магистрали системы охлаждения поступает в охладители электролита 7 с мешалками 8, отсюда нагретая электролитом вода по трубопроводам 9 возвращается в систему охлаждения. Система подачи электролита работает следующим образом. Насос забирает охлажденный электролит из задней части бака и через кран 10 подает в ванну обработки. Кран 11 предназначен для перекачки электролита в систему очистки и при работе установки закрыт. Электролит через уровневое окно в задней части ванны переливается в сборник 12 и через шланги 13 поступает в бак для охлаждения. При аварийном превышении уровня электролита в баке его излишки сливаются через патрубок 14. Для удаления шлама из ванны обработки предназначен кран 15. При перекачивании отработанного электролита в систему очистки кран 10 закрывается, а кран 11 открывается.

6.8 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭПО-3

Установка ЭПО-3 для лабораторных исследований процессов электролитно-плазменной обработки металлических материалов, для подбора и оптимизации режимов обработки различных металлических материалов и подготовки поверхностного слоя материала к микроструктурным исследованиям. Обрабатываемые материалы: низкоуглеродистые и нержавеющие стали, никелевые и хромоникелевые сплавы, алюминий, медь, титан и их сплавы.

Установка состоит из следующих узлов (рисунок 6.12): 1 – рабочая ванна, 2 – манипулятор, 3 – система перемешивания электролита, 4 – система охлаждения электролита, 5 – вытяжная труба, 6 – система нагрева электролита, 7 – источник питания с системой управления, 8 – кран слива электролита, 9 – электромагнитный клапан.

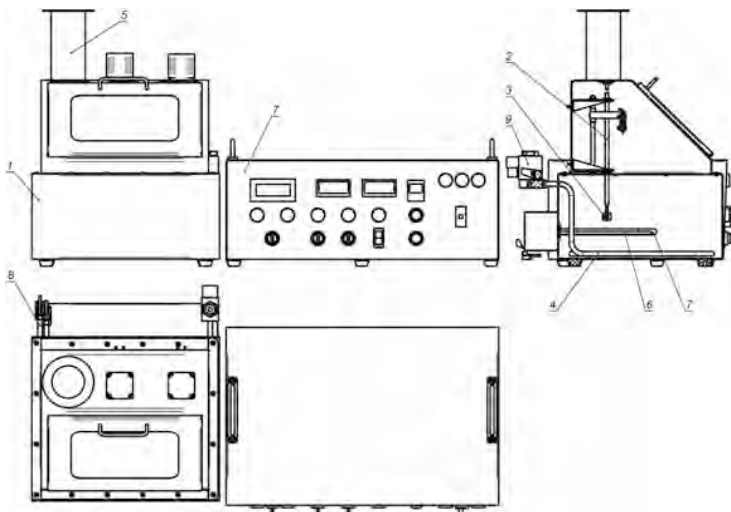


Рисунок 6.12 – Общий вид установки ЭПО-3

Основные технические характеристики установки ЭПО-3 приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Основные технические характеристики установки ЭПО–3

Наименование показателя	Характеристика
Продолжительность обработки, мин	1...10
Максимальная площадь обрабатываемых изделий, до см ²	60
Объем рабочей ванны, л	25
Размеры рабочей ванны, мм	400x350x180
Тип манипулятора	электромеханический
Ход манипулятора, мм	75
Мощность ТЭНа, кВт	1,5
Мощность выпрямителя, кВт	3
Тип выпрямителя	300/10
Род тока питающей сети	переменный, трехфазный
Частота тока, Гц	50
Напряжение питающей сети, В	380/220
Габаритные размеры установки, мм	1000
- длина	470
- ширина	180
- высота	
Масса, кг	60

Фотография установки ЭПО–3 приведена на рисунке 6.13.



Рисунок 6.13 – Установка ЭПО–3

6.9 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭПО–40

Установка электролитно-плазменной обработки ЭПО–40 предназначена для полирования деталей сложной конфигурации, изготовленных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава АМц. Основные технические данные и характеристики установки приведены в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Технические характеристики установки для электролитно-плазменной обработки ЭПО 40

Характеристика	Значение
Мощность источника питания, кВА	40
Выходное напряжение, В	300-320
Максимальный ток нагрузки, А	130
Общая площадь одновременно обрабатываемых изделий, см ²	800
Объем рабочей ванны, л	100
Размеры рабочей ванны, мм	480x480x500
Мощность ТЭНов, кВт	10
Система охлаждения электролита	Кожухотрубный теплообменник
Тип манипулятора	пневматический
Ход манипулятора	500 мм
Давление воздуха в пневмосети, МПа (кг/см ²)	0,5 (5)
Производительность вытяжной вентиляции, м ³ /ч (не менее)	500
Тип системы управления	релейная
Род тока питающей сети	переменный, трехфазный
Частота тока, Гц	50
Напряжение питающей сети, В	380/220
Габаритные размеры установки, мм	
- длина	1820
- ширина	1730
- высота	1900
Масса, кг	450

Установка состоит из следующих узлов (рисунок 6.14):

- 1 – рабочая ванна;
- 2 – источник питания с системой управления;
- 3 – насос прокачки электролита;
- 4 – электромагнитный клапан системы охлаждения электролита;
- 5 – теплообменник системы охлаждения электролита;
- 6 – пневмораспределитель манипулятора;
- 7 – кран слива электролита из установки;
- 8 – кран подачи электролита в установку;
- 9 – пневмоцилиндр манипулятора;
- 10 – вентиляционный канал.

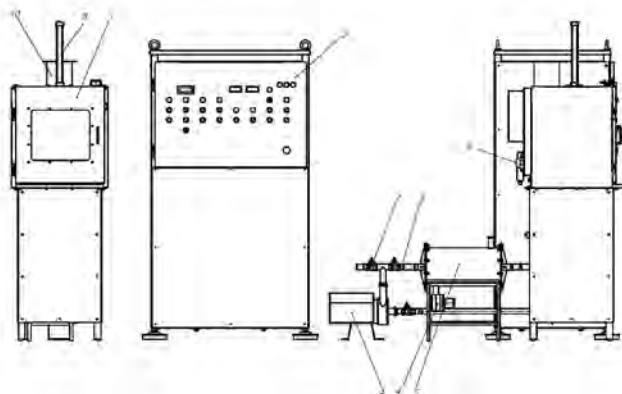


Рисунок 6.14 – Общий вид установки ЭПО 40 кВт



Рисунок 6.15 – Установка ЭПО 40 кВт

На рисунке 6.16 представлена принципиальная гидравлическая схема установки и расположение вентилей управления.

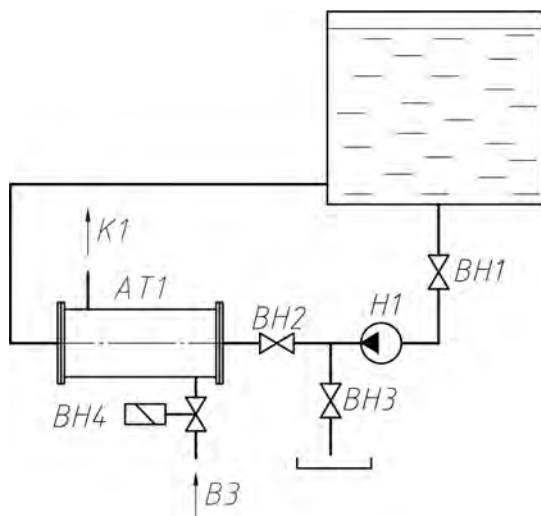


Рисунок 6.16 – Принципиальная гидравлическая схема установки

Назначение вентилей управления:

BH1 – подача электролита к насосу;

BH2 – подача электролита к теплообменнику;

BH3 – слив отработанного электролита из установки;

BH4 – включение подачи охлаждающей воды;

AT1 – теплообменник;

K1 – слив охлаждающей воды;

H1 – насос прокачки электролита.

Источник питания и система управления размещаются в отдельно стоящем шкафу с пультом управления. В шкафу располагаются силовой трансформатор 3х380В/3х130В, основная защитная аппаратура и аппаратура управления, обеспечивающие все виды защиты электрооборудования и реализацию последовательности работы установки.

6.10 Установка для электролитно-плазменной обработки ЭПО–100

Установка электролитно-плазменной обработки предназначена для полирования деталей сложной конфигурации, изготовленных из низкоуглеродистых сталей, нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов.

Основные технические данные и характеристики установки приведены в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Технические характеристики установки для электролитно-плазменной обработки ЭПО–100

Наименование показателя	Характеристика
Продолжительность обработки, мин	1...10
Общая площадь одновременно обрабатываемых изделий, до см ²	900
Объем рабочей ванны, л	110
Размеры рабочей ванны, мм	1260x830x480
Размеры ванны промывки, мм	800x600x500
Объем бака, л	1000
Тип манипулятора	электромеханический
Ход манипулятора	400 мм
Тип системы управления	микропроцессорная Siemens Logo!
Мощность ТЭНов, кВт	30
Мощность выпрямителя, кВт	100
Тип выпрямителя	300/330
Род тока питающей сети	переменный, трехфазный
Частота тока, Гц	50
Напряжение питающей сети, В	380/220
Габаритные размеры установки, мм	
- длина	4000
- ширина	2000
- высота	2620
Масса, кг	1500

Общий вид установки представлен на рисунке 6.17. Установка состоит из следующих узлов:

- 1 – бак;
- 2 – рабочая ванна;
- 3 – манипулятор;
- 4 – система циркуляции электролита;
- 5 – система охлаждения электролита;
- 6 – система перемешивания электролита;
- 7 – система паро- и брызгоулавливания;
- 8 – система промывки;
- 9 – система утилизации электролита;
- 10 – источник питания с системой управления;
- 11 – силовой трансформатор.

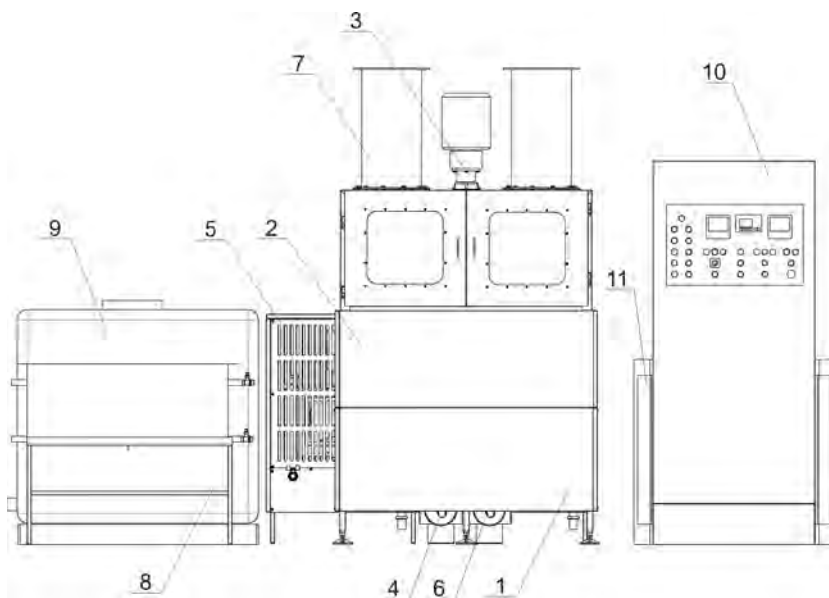
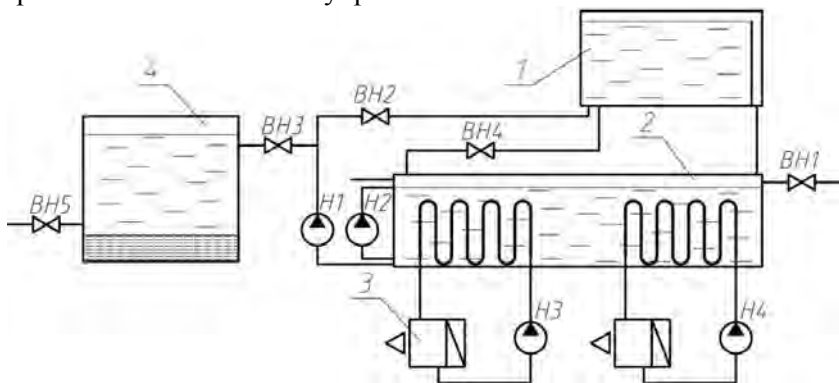


Рисунок 6.17 – Общий вид установки ЭПО – 100



Рисунок 6.18 – Установка ЭПО 100 кВт

На рисунке 6.19 представлена принципиальная схема установки и расположение вентилей управления.



1 – рабочая ванна, 2 – бак с теплообменниками системы охлаждения, 3 – радиатор с осевым вентилятором, 4 – бак системы утилизации электролита
Рисунок 6.19 – Принципиальная схема установки

Назначение вентилей управления:

ВН1 – подвод воды к установке;

ВН2 – включение подачи электролита из бака в рабочую ванну;

ВН3 – слив отработанного электролита из установки в бак системы утилизации;

ВН4 – слив электролита из рабочей ванны в бак;

ВН5 – слив электролита из бака системы утилизации.

Рабочая ванна служит емкостью для выполнения обработки. Выполнена сварной из нержавеющей стали. С внешней стороны ванны имеется контакт, к которому подведен отрицательный полюс источника тока. При перегреве объема электролита, находящегося в рабочей ванне выше заданного значения, электролит из бака перекачивается в рабочую ванну с помощью центробежного насоса. Разогрев электролита до рабочей температуры осуществляется ТЭНами, встроенными в рабочую ванну. В рабочей ванне установлен датчик температуры. Перелив излишка электролита из рабочей ванны в бак происходит через специальное окно.

Бак служит для приготовления, хранения и охлаждения электролита. Выполнен сварным из коррозионностойкой стали, скреплен каркасом. В бак встроены теплообменники системы охлаждения электролита, датчик температуры и датчик уровня электролита.

Манипулятор представляет собой передачу винт-гайка с приводом от мотор-редуктора. Служит для перемещения заготовки из положения «Загрузка» в положение «Обработка» и обратно. Обеспечивает подвод рабочего напряжения на обрабатываемую заготовку.

Система циркуляции электролита служит для перекачки охлажденного электролита из бака в рабочую ванну. Включается при перегреве электролита в рабочей ванне выше заданного значения.

Система охлаждения электролита служит для охлаждения всего объема электролита, находящегося в установке. Включается при повышении температуры электролита в баке выше заданного значения.

Система перемешивания электролита служит для выравнивания температуры по объему бака. Включается вместе с системой охлаждения электролита.

Система паро- и брызгоулавливания служит для улавливания и осаждения паро-газовой смеси, образующейся над поверхностью

электролита в рабочей ванне в процессе обработки. Осажденный конденсат стекает обратно в рабочую ванну.

Система утилизации электролита предназначена для сбора и утилизации отработанного электролита. После отстаивания в баках жидкая фаза электролита заливается в рабочую ванну установки. Выпадающий на дне осадок, состоящий из оксидов и гидроксидов металлов, нейтрализуется реагентными методами.

Источник питания и система управления размещаются в отдельно стоящем шкафе с пультом управления. В электрошкафе располагаются основная защитная аппаратура и аппаратура управления, обеспечивающие все виды защиты электрооборудования и реализацию последовательности работы установки. Основой электрической схемы установки являются логические модули LOGO!, производства концерна Siemens. Алгоритм функционирования модулей задается специальной программой, составленной из набора встроенных функций. Некоторые функции и параметры могут программироваться в процессе эксплуатации установки при помощи клавиатуры расположенной на дисплее, а так же блоке управления модуля LOGO!.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты экспериментальных исследований и анализа методов получения длинномерных изделий малого диаметра продольной прокаткой, шлифованием, волочением, электрохимической размерной обработкой и электролитно-плазменной обработкой показали, что с учетом требований, предъявляемых к структуре и свойствам материала, наиболее приемлемым методом формообразования концентраторов-инструментов является размерная электролитно-плазменная обработка, обеспечивающая сохранение исходной структуры и свойств, равномерность механических характеристик по длине изделия и высокое качество поверхности, позволяющая формировать рабочий наконечник концентраторов-инструментов без дополнительной сварки или пайки. С учетом особенностей процесса размерной электролитно-плазменной обработки и условий эксплуатации разработана конструкция концентраторов-инструментов в виде ступенчатого стержня с диаметром проксимальной части 1,8– 1,5 мм, диаметром дистальной части 0,5– 1,0 мм, с плавными переходами между ступенями по типу концентратора Фурье, позволяющая усиливать амплитуду продольных колебаний в 2,5– 3 раза.

2. В результате экспериментальных исследований структуры и свойств поверхностного слоя цилиндрической заготовки, полученной волочением с последующей электролитно-плазменной обработкой продолжительностью от 1 до 10 мин, установлено, что применение электролитно-плазменной обработки между проходами волочения обеспечивает снижение величины растягивающих остаточных напряжений с 1080 до 770 МПа в поверхностном слое образца за счет снижения плотности дислокаций с $1,52 \cdot 10^{10}$ до $0,77 \cdot 10^{10}$ см⁻², удаления инородных включений и продуктов износа инструмента, снижения микротвердости с 4100 до 2500 МПа, сглаживания и удаления продольных складок и уменьшения шероховатости поверхности, приводящего к снижению коэффициента трения при последующих проходах волочения. При этом наиболее существенное снижение растягивающих остаточных напряжений происходит в результате промежуточной электролитно-плазменной обработки продолжительностью до 3 мин.

3. В результате экспериментальных исследований влияния промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе получения заготовки концентратора-инструмента волочением на прочностные и акустические характеристики материала установлено, что промежу-

точная электролитно-плазменная обработка продолжительностью 3 мин, обеспечивает наиболее приемлемое сочетание высокой прочности (1480 МПа) и низких растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое (880 МПа), а также повышение предела выносливости материала заготовки на 21 % за счет снижения растягивающих остаточных напряжений и повышение интенсивности передаваемого ультразвука на 22–24 % за счет снижения плотности дислокаций, количества дефектов и инородных включений, которые являются причиной затухания колебаний.

4. В результате экспериментальных исследований закономерностей влияния параметров электролитно-плазменной обработки (температуры электролита, рабочего напряжения, глубины погружения) и радиуса кривизны обрабатываемой поверхности на скорость съема металла, установлено, что размерная электролитно-плазменная обработка цилиндрических длинномерных поверхностей малого диаметра из стали 12Х18Н9 может выполняться в следующих диапазонах параметров: температура электролита 70–95 °С, рабочее напряжение 240–300 В, глубина погружения 5–125 мм, а изменение скорости съема металла при различных значениях параметров электролитно-плазменной обработки связано с изменением плотности тока, причем зависимость скорости съема от плотности тока при электролитно-плазменной обработке имеет линейный характер.

Установлено, что наиболее существенное влияние на скорость съема металла, оказывает температура электролита, наименьшее влияние – глубина погружения, а максимальная скорость съема металла 9,5 мкм/мин (для заготовки диаметром 1,8 мм) достигается при температуре электролита 70 °С, глубине погружения 125 мм и рабочем напряжении 240 В.

5. В результате анализа и экспериментальной проверки предложенной математической модели процесса формообразования поверхностей малого диаметра в процессе электролитно-плазменной обработки, учитывающей связь скорости съема металла и плотности тока с температурой электролита, рабочим напряжением и глубиной погружения, и позволяющей выполнять расчет текущей скорости съема металла и необходимой продолжительности с учетом изменения радиуса кривизны в процессе обработки, установлено, что зависимость плотности тока от радиуса кривизны носит гиперболический характер. При температуре электролита 80 °С, глубине погружения 20 мм и рабочем напряжении 300 В уменьшение радиуса кривизны обрабатываемой поверхности с

3 мм до 0,25 мм приводит к повышению плотности тока с 0,26 А/см² до 0,69 А/см² и, соответственно, к повышению скорости съема металла с 3,9 мкм/мин до 10,4 мкм/мин.

6. Разработана технология изготовления концентраторов-инструментов, включающая процесс изготовления цилиндрической заготовки волочением с промежуточной электролитно-плазменной обработкой и процесс формообразования цилиндрических ступеней концентраторов-инструментов и плавных переходов сложного профиля методом размерной электролитно-плазменной обработки. Процессы формообразования поверхностей ультразвуковых концентраторов-инструментов восьми типоразмеров методом размерной электролитно-плазменной обработки ТП № ИШПЖ 000025.001 – № ИШПЖ 000025.008, процесс получения цилиндрической заготовки волочением с промежуточной электролитно-плазменной обработкой ТП № ИШПЖ 000022.001, а также установка для формообразования поверхностей концентраторов-инструментов методом размерной электролитно-плазменной обработки КД № ИШПЖ 15.00.00.000 внедрены на Государственном предприятии «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» для изготовления сложнопрофильных длинномерных ультразвуковых медицинских концентраторов-инструментов малого диаметра. Разработанные процессы защищены евразийским патентом, патентом Республики Беларусь и решением о выдаче патента Республики Беларусь.

Разработаны технические условия ТУ ВУ 100232486.013–2007 на изделие «Инструменты-волноводы для ультразвуковой ангиопластики». На основании положительных результатов технических, санитарно-гигиенических и медицинских испытаний получено регистрационное удостоверение № ИМ-7.93118/1003, разрешающее производство концентраторов-инструментов и их применение в медицинской практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
2. US Patent Application 2007/0131034 A1. Amplifying ultrasonic waveguides.
3. А.В. Люшинский. Диффузионная сварка разнородных материалов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 208 с.
4. В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко. Перспективы использования гибких ультразвуковых волноводных систем в медицине и технике // Приборы и методы измерений. – № 1. – 2010. – С. 6-16.
5. Адзериho, И.Э. Ультразвуковой тромболитис в лечении артериального тромбоза: дис. ... д-ра мед. наук : 14.00.06 / И.Э.Адзериho. – Минск, 2004. – 322 с.
6. Рачок, С.М. Ультразвуковое разрушение тромбов в присутствии стрептокиназы: эффективность и влияние на гемокоагуляционный и сосудисто-тромбоцитарный гемостаз (экспериментальное исследование) : автореф. ... дис. канд. мед. наук : 14.00.06 / С.М.Рачок; БелМАПО. – Минск, 2005. – 19 с.
7. Тун, Цзяи. Эффективность восстановления проходимости пораженных атеросклерозом артерий ультразвуковыми волноводами различных модификаций in vitro : автореф. дис. канд. мед. наук: 14.00.06 / Цзяи Тун; БелМАПО. Минск, 2006. 21 с.
8. Platelet activation in increased in peripheral arterial disease / K.Cassar [et al] // J. Vasc. Surg. – 2003. – Vol.11, №5. – P.53–59.
9. Activation, aggregation and adhesion of platelets exposed to high-intensity focused ultrasound / S.L. Poliachik [et al] // Ultrasound Med. Biol. – 2001. – Vol.27, №11. – P. 1567–1576.
10. Goyen, M. Intravascular ultrasound angioplasty in peripheral arterial occlusion – Preliminary experience / M. Goyen [et al] // Act Radiol. – 2001. – Vol. 41, №2. – P. 122–124.
11. Lee, J.T. Applications of intravascular ultrasound in the treatment of peripheral occlusive disease / Lee J.T. [et al] // Semin. Vasc. Surg. – 2006. – Vol. 19, №3. – P. 139–144.
12. Казанцев, В.Ф. Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок : учеб. пособие / В.Ф. Казанцев. – М.: Машиностроение, 1980. – 44 с.

13. Мечетнер, Б.Х. Методы расчета и конструирования концентраторов-инструментов для ультразвуковой обработки / Б.Х. Мечетнер. – М.: ГОСИНТИ, 1963. – 84 с.
14. Гордеева, Т.А. Анализ изломов при оценке надежности материалов / Т.А. Гордеева, И.П. Жегина. – М.: Машиностроение, 1978. – М.: Машиностроение, 200 с.
15. Терентьев, В.Ф. Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев. – М.: Наука, 2003. – 253с.
16. Соколов, И.А. Остаточные напряжения и качество металлопродукции / И.А. Соколов, В.И. Уральский. – М.: Metallurgia, 1981. – 96 с.
17. Гликман, Л.А. Методы определения остаточных напряжений / Л.А. Гликман // Тр. Ленингр. инж.-экон. ин-та. – Л., 1960. вып. 30. – С. 254–260.
18. Поздеев, А.А. Остаточные напряжения: теория и приложения / А.А. Поздеев, Ю.И. Няшин, П.В. Трусов. – М.: Наука, 1982. – 112 с.
19. Вишняков, Я.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Я.Д. Вишняков, В.Д. Пискарев. – М.: Metallurgia, 1989. – 254 с.
20. Кудрявцев, Ю.Ф. Изменение предельных циклических напряжений под действием остаточных напряжений / Ю.Ф. Кудрявцев, П.П. Михеев // Конструкционная прочность и механика разрушения сварных соединений: материалы науч.-техн. семинара – Л., 1986. – С. 68–72.
21. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде / Г.В. Карпенко. – М.: Машгиз, 1963. – 187 с.
22. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. – М.: Metallurgia, 1978. – 392 с.
23. Перлин, И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин. – 2-е изд., перераб. и допол. – М.: Metallurgia, 1971. – 411 с.
24. Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М.: Metallurgia, 1978. – 360 с.
25. Stone, R. Processing Effects on Residual Stress / R. Stone // Proceedings of SMI Close the Loop Technical Symposium / – Spring Manufactures Institute – Oak Brook, Illinois, – 2002. P. 61–66.
26. Сулима, А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов Текст. / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. М.: Машиностроение, 1974 – 256 с.

27. Терентьев, В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. пособие / В.Ф. Терентьев, А.А. Оксогоев. – Новосибирск: НГТУ, 2001. – 61 с.
28. Агранат, Б.А. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособие для ВУЗов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский. М.: Высш. шк. 1987. – 352 с.
29. Шаталов, Р.Л. Теория процессов прокатки и волочения: учебник для ВУЗов по спец. ОМД / Р. Л. Шаталов. – М : Издательство МГОУ, 1993. – 250 с.
30. Рахштадт, А.Г. Пружинные стали и сплавы / А.Г. Рахштадт. – М.: Металлургия, 1971. – 496 с.
31. Kramer I.R. Surface layers effects on the plastic deformation of iron and molybdenum. // Trans.Met.Soc. AIME, 1967, v. 239, P.520–530.
32. Алехин, В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В.П. Алехин. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
33. Беркович, И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; под ред. Д.Г. Громаковского. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2000. – 268 с.
34. Голубев, Ю.М. Влияние наклепанного поверхностного слоя ультразвукового инструмента на амплитуду колебаний / Ю.М. Голубев, В.Н. Филимоненко // Ультразвуковая техника. – 1964. – №6. – С. 49–53.
35. Патент РБ ВУ 3806 С1, МПК А61В 17/22, 17/32. Способ разрушения венозных и артериальных тромбов / Л.А. Эмилиит, А.Г. Мрочек, И.Э. Адзериho. – № a19980138; заявл. 12.02.98; опубл. 30.03.2001; приоритет 12.02.98.
36. Каневский, И.Н. Фокусировка звуковых и ультразвуковых волн / И.Н. Каневский. – М.: Наука, 1977. – 377 с.
37. Степаненко, Д.А. Исследование динамической устойчивости гибких волноводов для ультразвуковой тромбэктомии / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Вестник БНТУ. – 2011. – №5. – С. 41–46.
38. Минченя В.Т. Перспективы использования гибких ультразвуковых волноводных систем в медицине и технике / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко // Приборы и методы измерений. – 2010. – №1. – С. 6–16.
39. Разработать и внедрить метод ультразвуковой реканализации у больных с поражением брахиоцефальных артерий : отчет о НИР / УП «Технопарк БНТУ «Метолит» ; рук. Ю.Г. Алексеев. – Минск, 2008. – 82 с. – № ГР 20072874.

40. Gavin, Graham P. (2005) Experimental and numerical investigation of therapeutic ultrasound angioplasty. PhD thesis, Dublin City University.

41. Noone, D., Gavin, G.P., McGuinness, G.B., Design issues for therapeutic ultrasound angioplasty waveguides, 25th International Manufacturing Conference IMC 2008, Dublin, 3rd–5th September 2008.

42. Siegel, R.J. Clinical Trial of Percutaneous Peripheral Ultrasound Angioplasty / R.J. Siegel, P. Gaines, J.R. Crew, D.C. Cumberland // JACC. – 1993. – Vol. 22, № 2. – P. 480–488.

43. United States Patent Application 5397301, B1, IPC A61B 17/20. Ultrasonic angioplasty device incorporating an ultrasound transmission member made at least partially from a superelastic metal alloy / R. Pflueger, H. Nita, S. Bacich, R. Siegel, G. Bond, E. DeCastro. – Serial No. 08/094416; filed 19.07.1993; published 14.03.1995; priority 14.02.1995.

44. Gavin, G.P. An acoustic fluid-structure simulation of a therapeutic ultrasound wire waveguide apparatus / G.P. Gavin, F.M. Dolan, S.J. Hashmi, G.B. McGuinness // Journal Of Medical Devices. – 2005. – № 4 – P. 254–263.

45. Влияние ультразвука на процессы деформирования металлов в сверхпластичном режиме / В.В. Клубович, О.В. Абрамов, В.О. Абрамов, С.А. Кириллов, И.М. Котин // Доклады НАН Беларуси, №1, 2000, Т.44. – С. 111-114.

46. Артемьев, В.В. Ультразвуковые виброударные процессы : монография / В.В. Артемьев, В.В. Клубович, В.Н. Сакевич. – Минск : БНТУ, 2004. – 257 с.

47. Волновод для внутрисосудистой тромбэктомии тромбов и тромбозболов и метод его изготовления : пат. 005704 ЕАПО, МПК А61В 17/22, 17/32 ; С25F 3/16 / А.Г. Мрочек, И.Э. Адзериho, 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.

48. Zhou G., Zhang Y., Zhang B. The complex-mode vibration of ultrasonic vibration systems // Ultrasonics. Vol. 40. 2002. Pp. 907-911.

49. Zhou G. The performance and design of ultrasonic vibration system for flexural mode // Ultrasonics. Vol. 38. 2000. Pp. 979-984.

50. Чигарев, А.В. Проектирование ультразвукового гибкого волновода для ликвидации тромбов в артериях / А.В. Чигарев, В.Т. Минченя, А.А. Кураленко // Теоретическая и прикладная механика. Межведом-

ственный сборник научно-методических статей № 18. Мн., 2005. – С.175–177.

51. Киселев, М.Г. Ультразвук в медицине / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко – Мн.: Изд-во «Техническая литература», 2009. – 428 с.

52. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.

53. Ерманок, М.З. Волочение цветных металлов / М.З. Ерманок, Л.С. Ватрушин – М.: Metallurgia, 1982. – 272 с.

54. Станюкович, А.В. Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов / А.В. Станюкович. – М.: Metallurgia, 1967. – 200 с.

55. Левинсон, Е.М. Электроэрозионная обработка металлов: справочное пособие по электротехнологии / Е.М. Левинсон, В.С. Лев. – Л.: Лениздат, 1961. – 184 с.

56. Юхвец, И.А. Волоочильное производство / И.А. Юхвец. – М.: Metallurgia, 1987. – 319 с.

57. Марьин, Б.Н. Теория и технология волочения. Основы процесса волочения: Учеб.пособие. – 2-е изд., доп. / Б.Н. Марьин, С.Б. Марьин, В.В. Куриный, Е.А. Тютин. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2006. – 85 с.

58. Колпашников, А.И. Высокопрочная нержавеющая проволока /А.И. Колпашников, А.С. Белоусов, В.Ф. Мануйлов. – М. : Metallurgia, 1971. – 184 с.

59. Королёв, А.Ю. Исследование методов изготовления ультразвукового воновода-излучателя / А.Ю. Королёв, // V Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов Республики Беларусь (НИРС-2000) : материалы конференции, Гродно, 25-27 апреля 2000 г. : в 5 ч. / Гродненск. госуд. ун-т; редкол. : С.А. Маскевич [и др.]. – Гродно, 2000. – Ч.5. – С. 350–353.

60. Красильников, Л.А. Волочильщик проволоки / Л.А. Красильников, А.Г. Лысенко. – М.: Metallurgia, 1987. – 320 с.

61. Северденко, В.П. Основы теории прокатки / В.П. Северденко. – Минск: Наука и техника, 1969. – 244 с.

62. Северденко, В.П. Прокатка и волочение с ультразвуком / В.П. Северденко, В.В. Клубович, А.В. Степаненко – Мн.: Наука и техника, 1970. – 280 с.

63. Целиков, А.И. Теория прокатки: Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. М.: Metallurgia, 1982. – 335 с.

64. Клубович, В.В. Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей: монография / В.В. Клубович, В.А. Томило. Мн.: БНТУ, 2007. – 298 с.

65. Степаненко, А.В. Разработка и исследование продольной прокатки круглых конических профилей / А.В. Степаненко, А.Ю. Королёв, А.Н. Бусел // Прогрессивные технологии обработки материалов давлением: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика АН БССР В.П. Северденко, Минск, 18-22 мая 2004 г.: в 2 ч. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол. : А.В. Степаненко [и др.]. – Минск, 2004. – Ч.1. – С. 38–42.

66. Маслов, Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974 – 320 с.

67. Ящерицын, П.И. Шлифование металлов / П.И. Ящерицын. – Минск : Наука и техника, 1970. – 463 с.

68. Ашкиназий, Я.М. Бесцентровые круглошлифовальные станки. Конструкция, обработка и правка / Я.М. Ашкиназий. – М.: Машиностроение, 2003. – 352 с.

69. Исследовать и разработать методы упрочнения, формообразования и финишной обработки сложнопрофильного инструмента из высоколегированных сталей и сплавов медицинского назначения отчет о НИР (заключ.) / УП «Технопарк БНТУ «Метолит»; рук. темы Ю.Г. Алексеев. – 2000. – 66 с. – № ГР 20002412.

70. Дальский, А.М. Технология конструкционных материалов / А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

71. Амитан, Г.Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; под. общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с.

72. Коленко, Е.А. Технология лабораторного эксперимента: справочник. – С-Пб.: Политехника, 1994. – 751 с.

73. Бахчисарайцян, Н.Г. Практикум по прикладной электрохимии // Учеб. пособие для вузов; под ред. В. Н. Варыпаева, В.Н. Кудрявцева. 3-е изд., перераб. / Н.Г. Бахчисарайцян, Ю.В. Борисоглебский, Г.К. Буркат и др – Л.: Химия, 1990. – 304с.

74. Пяндрина, Т.Н. Электрохимическая обработка металлов : (электролитическое полирование) / Т.Н. Пяндрина ; ред. Л.Я. Попилов. – М.: Машгиз, 1961. – 50 с.

75. Кнорозов, Б.В. Технология металлов и материаловедение / Б.В. Кнорозов, Л.Ф. Усова, А.В. Третьяков и др. – М.: Металлургия, 1987. – 800 с.

76. Грилихес, С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойства металлов. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленигр. отд-е, 1987. – 232 с.

77. Мельников, П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.

78. А.с. СССР № 1775508 C25F 3/16. Способ электролитно-плазменного полирования изделий сложной формы / В.К. Станишевский, Г.Е. Слепнев, Л.М. Семенов, А.А. Кособуцкий, А.Э. Паршутто, В.А. Хлебцевич. Оpubл. 1992, Бюл. № 42.

79. Физико-механические свойства и электрополирующие процессы в материалах, находящихся в мощных электростатических и электромагнитных полях [текст]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. темы А. А. Кособуцкий. – Минск, 2004. – 61 с. – № ГР 20022618.

80. Степаненко, А.В. Электролитно-разрядная обработка металлов (ЭРОМ) / А.В. Степаненко, Д.С. Доманевский, Ю.Г. Алексеев, А.А. Кособуцкий, А.Э. Паршутто, Ю.В. Баранов, В.А. Бурский, В.П. Казаченко // Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов: докл. междунар. конф., Москва, 21–24 окт. 2003 г. / ИМАШ; редкол.: О.А. Троицкий [и др.]. – М., 2003. – С. 84–86.

81. Куликов, И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. – Минск : Беларус. Навука, 2010. – 232 с.

82. Синькевич, Ю.В. Обеспечение геометрических параметров качества поверхности электроимпульсным полированием / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковкий Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Межд. сб. науч. ДонНТУ. – Донецк, 2006. – Вып. 32. – С. 200–206.

83. Синькевич, Ю.В. Вероятностно-статистическая оценка шероховатости поверхности электроимпульсно полированных деталей / Ю.В. Синькевич, А.А. Гриневич, И.Н. Янковский // Вестник Белорусского национального технического университета : научно-технический журнал. – 2011. – N 5. – С. 9–18.

84. Способ электрохимической обработки металлических изделий, преимущественно из меди и медных сплавов, под гальванические покрытия : пат. 8424 Респ. Беларусь, МПК 7 C 25F 3/16, / И.С. Куликов,

А.Я. Каменев, Л.А. Климова, В.Л. Ермаков; заявитель ГНУ "ОИЭиЯИ – Сосны" НАНБ. – № а 20031087 ; заявл. 2003.11.25 ; опубл. 2006.08.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 4. – С. 127.

85. Электролит для полирования изделий из титана и его сплавов : пат. 7570 Респ. Беларусь, МПК 7 С 25F 3/16, / И.С. Куликов, А.Я. Каменев, Л.А. Климова; заявитель ГНУ "ОИЭиЯИ – Сосны" НАНБ. – № а 20030199 ; заявл. 2003.03.06 ; опубл. 2005.12.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 6. – С. 174.

86. Электролит для плазменно-электролитного полирования изделий из алюминия и его сплавов : пат. 7291 Респ. Беларусь, МПК 7 С 25F 3/20, / И.С. Куликов, А.Я. Каменев, В.Л. Ермаков, С.В. Ващенко, Л.А. Климова; заявитель ГНУ "ОИЭиЯИ – Сосны" НАНБ. – № а 20020425 ; заявл. 2002.05.20 ; опубл. 2005.09.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 3. – С. 139.

87. Синькевич, Ю.В. Электроимпульсное полирование деталей из коррозионностойких и углеродистых конструкционных сталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / Ю.В. Синькевич. – Минск, 1998. – 163 с.

88. Синькевич, Ю.В. Фазовый состав и микроструктура электроимпульсно полированной поверхности коррозионно-стойких сталей / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Межд. сб. науч. тр. ДонНТУ. Донецк. 2009. Вып. 37. – С. 233–239.

89. Семченко, Н.И. Коррозионное поведение аустенитных нержавеющих сталей после электролитно-плазменного полирования / Н.И. Семченко, А.Ю. Королев // IV Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (13–18 мая 2005 г., Иваново, Россия): Сборник трудов/ Ивановский гос. хим.-технол. университет. Иваново, 2005. – Т.2. – 668 с., С. 406–409.

90. Семченко, Н.И. Структура и свойства антикоррозионных износостойких вакуумных покрытий на поверхности изделий из аустенитной нержавеющей стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Н.И. Семченко ; Ин-т механики металлополимер. систем им. В.А. Белого Нац. акад. наук Беларуси. – Минск., 2010. – 22 с.

91. Исследование и разработка процесса электроимпульсного полирования углеродистых конструкционных и коррозионно-стойких сталей : отчет о НИР (заключительный) : 09-14 / Белорусский националь-

ный технический университет; рук. Шелег В.К., исполн. Беляев Г.Я., [и др.]. – Минск, 2010. – 103 с. – Библиогр.: с. 92 – 98. – № ГР 20091488.

92. Янковский, И.Н. Электроимпульсное полирование коррозионно-стойких и углеродистых конструкционных сталей с обеспечением заданного комплекса свойств обрабатываемых поверхностей: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / И.Н. Янковский. – Минск, 2008. – 175 с.

93. Синькевич, Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования подложки на прочность сцепления гальванических покрытий / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Межд. сб. науч. тр. ДонНТУ. Донецк. 2009. Вып. 37. – С. 228–232.

94. Aliakseyeu, Y.G. Electrolite-plasma treatment of metal materials surfaces / Y.G. Aliakseyeu, A.Y. Korolyov, A.V. Bezyazychnaya // CO-MAT-TECH 2006 : Proceeding of the abstracts of 14-th International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19-20 October 2006, – Slovakia, Trnava, – P. 6.

95. Клубович, В.В. Ультразвуковая обработка материалов. / В.В. Клубович, А.В. Степаненко – Мн.: Наука и техника, 1981. – 295с.

96. Колесников, А.Е. Ультразвуковые измерения / А.Е. Колесников. – М.: Изд. стандартов, 1982. – 277 с.

97. Гервасьев, М.А. Стали и сплавы. Марочник / М.А. Гервасьева; под ред. Сорокина В.Г. – М: Интернет инжиниринг, 2003. – 608 с.

98. Колачев, Б.А. Титановые сплавы разных стран: Справочник /Б.А. Колачев, И.С. Польшкин, В.Д. Талалаев. – М.: ВИЛС, 2000. – 316 с.

99. Чечулин, Б.Б. Титановые сплавы в машиностроении / Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева, В.И. Гольдфайн. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.

100. Кривоухов, В.А. Обработка резанием титановых сплавов / В.А. Кривоухов, А.Д. Чубаров. – М.: Машиностроение, 1970. – 180 с.

101. Резников, Н.И. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов / Н.И. Резников, Е.В.Бурмистров, И.Г. Жарков и др.; под. ред. Н.И. Резникова. – М.: Машиностроение, 1972. – 200 с.

102. Рускол, Ю.С. Титановые конструкционные сплавы в химических производствах: справочное издание / Ю.С. Рускол. – М.: Химия, 1989. – 288 с.

103. Балкевич, В.Л. Новые материалы в технике / В.Л. Балкевич, Б.А.Колачев, А.К. Натансон; под ред. Е.Б. Тростянской, Б.А. Колачева, С.И. Сильвестровича. – М.: Гостоптехиздат. 1962. – 656 с.

104. Глазунов, С.Г. Конструкционные титановые сплавы / С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев. – М.: Металлургия, 1974. – 366 с.
105. Солонина, О.П. Жаропрочные титановые сплавы / О.П. Солонина, С.Г. Глазунов. – М.: Металлургия, 1976. – 447 с.
106. Томашов, Н.Д. Коррозия и коррозионностойкие сплавы / Н.Д. Томашов, Т.П. Чернова. – М., Металлургия, 1973. – 232 с.
107. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Учеб. пособие для вузов / С.С. Горелик, Ю.А. Скакова, Л.Н. Расторгуев. – М.: МИСиС, 2002. – 360 с.
108. Горловский, М.Б. Справочник волочильщика проволоки / М.Б. Горловский, В.Н. Меркачѳ. – М.: Металлургия, 1993. – 256 с.
109. Колмогоров, Г.Л. Инструмент для волочения / Г.Л. Колмогоров, С.И. Орлов, В.Ю. Шевляков. – М.: Металлургия, 1992. – 144 с.
110. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: ГИТТЛ, 1963. – 178 с.
111. Циммерман, Р. Металлургия и материаловедение: Справочник / Р. Циммерман, К. Гюнтер. – М.: Металлургия, 1982. – 480 с.
112. Волков, С.С. Расчет и конструирование ультразвуковых сварочных машин / С.С. Волков; под ред. Н.М. Жигулёва. – М.: ВЦИИИ, 1974, – 104 с.
113. Маргулис, М.А. Сравнительный калориметрический метод определения ультразвуковой мощности / М.А. Маргулис, А.М. Мальцев. // Ж.Физ.Химии, т.43. 1969. – №4. – С.1055–1059.
114. Авсеевич, О.И. Расчет толщины парогазовой оболочки при электроимпульсном полировании / О.И. Авсеевич, Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов, С.И. Романчук // Машиностроение. – Минск, 1989. – Вып. 14. – С. 68–71.
115. Алексеев, Ю.Г. Комплексная технология изготовления изделий медицинской техники, основанная на пластическом деформировании и физико-технических методах / Ю.Г. Алексеев, В.Н. Страх, А.Ю. Королев // Литье и металлургия. – 2005. – №4. – С. 180–187.
116. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т / И.В. Фомихина, Ю.О. Лисовская, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королев, В.С. Нисс // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – №3. – С. 24–29.
117. Васильева, А.Г. Деформационное упрочнение закаленных конструкционных сталей / А.Г. Васильева. – М.: Машиностроение, 1981. – 231 с.

118. Приданцев, М.В. Высокопрочные аустенитные стали / М.В. Приданцев, Н.П. Талов, Ф.Л. Левин. – М.: Металлургия, 1969. – 247 с.

119. Клубович, В.В. Ультразвук в технологии производства композиционных кабелей / В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко. – Минск.: Беларуская навука, – 2011. – 293 с.

120. Изменение структуры поверхностного слоя нержавеющей стали при электролитно-плазменной обработке / А.Ю. Королёв, И.В. Фомихина, Ю.О. Лисовская, Н.Н. Галеева // Порошковая металлургия. Респ. межвед. сб. науч. тр. / Ин-т порошковой металлургии. Минск, 2007. – Вып. 30. – С. 270–276.

121. Влияние электролитно-плазменной обработки на изменение характеристик поверхностного слоя коррозионностойких аустенитных сталей / А.Ю. Королёв, Ю.Г. Алексеев, А.А. Кособуцкий, И.В. Фомихина, А.А. Повжик // Инженерия поверхности : сборн. научн. статей междунар. научно-техн. конф., 27-27 окт. 2007 г. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол. : В.М. Хвисевич [и др.]. – Брест, 2007. – С. 77–81.

122. Исследование влияния равномерности полировки различных зон сложной поверхности изделия в зависимости от глубины погружения, пространственной ориентации и скорости гидротоков при электролитно-плазменной обработке / И.В. Фомихина, Ю.О. Лисовская, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королев, В.С. Нисс // Сварка и родственные технологии : республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорус. гос. науч.-произв. концерн порошковой металлургии, Ин-т порошковой металлургии. – № 10 / редкол. : Г.Н. Здор (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – С. 37–42.

123. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхности / И.В. Фомихина, Ю.О. Лисовская, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сборн. докл. междунар. симпоз., Минск, 25-27 марта 2009 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. науч.-произв. концерн порошковой металлургии, Ин-т порошковой металлургии; редкол. : П.А. Витязь [и др.] – Минск, 2009. – Ч.2. – С. 158–165.

124. Изменение структуры модифицированного слоя нержавеющей стали при электролитно-плазменной обработке / И.В. Фомихина, Ю.Г. Алексеев, В.С. Нисс, А.Ю. Королёв // Инженерия поверхностного слоя деталей машин : сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27-28 мая 2010 г. / редкол. : Б.М. Хрусталеv, [и др.]. – Минск : БНТУ, 2010. – С. 226–232.

125. Исаевич, Л.А. Исследование процесса получения высокопрочной проволоки из стали 12Х18Н10Т волочением с электролитно-плазменной обработкой поверхности / Л.А. Исаевич, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв // Вестник БНТУ. – 2005. – №6. – С. 30–33.

126. Хмыль, А.А. Влияние метода полирования стали на шероховатость и эксплуатационные свойства контактных поверхностей / А.А. Хмыль, А.П. Достанко, В.Г. Анисимович, С.А. Чижик // Трение и износ. – 1996. – № 4. – С. 491 – 496.

127. Исследование влияния промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением / Ю.Г. Алексеев, Л.А. Исаевич, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – №3. – С. 85–90.

128. Алексеев, Ю.Г. Деформационное упрочнение заготовок волочением с промежуточной электролитно-плазменной обработкой / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 10-й Международной научно-технической конференции, Минск, 2012 г. : в 4 т. / редкол. : Б.М. Хрусталева (гл. ред.) [и др.] Минск : БНТУ, 2012. – Ч.1. – С. 345.

129. Дмитриев, А.М. Аппроксимация кривых упрочнения металлов / А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов // КШП. ОМД. – 2002. – № 6. – С. 16–21.

130. Белкин, П.Н. Стабилизация парогазового слоя при анодном нагреве в растворах электролитов / П.Н. Белкин, С.Н. Белкин // ИФЖ. – 1989. – Т.57. – С. 159–160.

131. Баковец, В.В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В.В. Баковец, О.В. Поляков, И.П. Долговесова // Наука. Сиб. отд-ние. – Новосибирск, 1991. – 168с.

132. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов : в 2 т. / И.В. Суминов [и др.] ; под общ. ред. И.В. Суминова. – М : Техносфера, 2011. – Т.1 – 464 с.

133. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю.Г. Алексеев, А.А. Кособуцкий, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс, Д.В. Кучерявый, А.А. Повжик // Литье и металлургия. – 2005. – №4. – С. 188–195.

134. Электролитно-плазменная обработка: особенности формирования парогазовой оболочки и ее влияние на съем материала при обработке поверхностей металлических изделий / Ю.Г. Алексеев, А.А. Кособуцкий, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс, Д.В. Кучерявый, А.А. Повжик //

Порошковая металлургия : достижения и проблемы : сборник материалов докладов Междунар. научно-техн. конф., Минск, 22-23 сент. 2005 г. / Ин-т порошковой металлургии; редкол. : Н.И. Пирожник [и др.]. – Минск, 2005. – С. 236–245.

135. Экспериментальные исследования и оптимизация технологических параметров размерной электролитно-плазменной обработки / В.С. Нисс, Ю.Г. Алексеев, А.Э. Паршутто, А.Ю. Королёв // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11 апреля 2012 г. – Минск : БНТУ, 2012. – С. 51–52.

136. Куликов, И.С. Особенности электроимпульсного полирования металлов в электролитной плазме / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, В.И. Василевский // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1995. – №4.

137. Белкин, П.Н. Исследование проводимости паровой пленки при анодном электролитном нагреве // ДАН СССР / В.И. Ганчар, Ю.Н. Петров. 1986. – т. 291, – №5. – С. 1116 – 1119.

138. Белкин, П.Н. Прохождение тока через парогазовую оболочку при анодном электролитном нагреве // Электронная обработка материалов / В.И. Ганчар. – 1988. – №5. – С. 59–62.

139. Шубин, А.С. Курс общей физики / А.С. Шубин. – М.: Высш. школа, 1976. – 480 с.

140. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю.Г. Алексеев А.Ю. Королёв, А.Э. Паршутто, В.С. Нисс // Наука и техника. – 2012. – №3. – С. 3–6.

141. Экспериментально-расчетная модель размерной электролитно-плазменной обработки цилиндрических поверхностей / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, А.Э. Паршутто, В.С. Нисс // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы VI конференции Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19-21 сент. 2012 г. Кн. 2. Высокоэнергетические технологии получения и обработки материалов. Технологии и оборудование инженерии поверхности / Минск. ФТИ НАН Беларуси / ред. коллегия : С.А. Астапчик (гл. ред.). – Минск : ФТИ НАН Беларуси, – 2012. – С. 144–151.

142. Каледин, Б.А. Планирование экспериментов в порошковой металлургии. Ч.2: Планы второго порядка / Б.А. Каледин. – Минск: БПИ, 1982. – 113 с.

143. Королёв, А.Ю. Оптимизация технологических параметров размерной электролитно-плазменной обработки / А.Ю. Королёв, Ю.Г.

Научное издание

АЛЕКСЕЕВ Юрий Геннадьевич
КОРОЛЁВ Александр Юрьевич
МИНЧЕНЯ Владимир Тимофеевич и др.

**КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ
КОНЦЕНТРАТОРОВ-ИНСТРУМЕНТОВ**

Подписано в печать 23.04.2015. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 9,27. Тираж 100. Заказ 273.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.