

На правах рукописи

Слепцов Аркадий Дмитриевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ
ЩЕЛЕВЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ СТРУКТУР**

Специальность: 05.02.07 - Технологии и оборудование механической и физико-
технической обработки
05.02.08 - Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Зубков Николай Николаевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Кондаков Александр Иванович

Кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Андреев Виктор Николаевич

Ведущее предприятие: ЗАО «Новомет-Пермь»

Защита состоится " ____ " _____ 2011 г. в _____.
на заседании диссертационного совета Д212.141.06 при Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1-м экземпляре, заверенный печатью, просим
направить по указанному адресу на имя секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок (499) 267-09-63.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент

_____ В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день проблема тонкой и средней фильтрации является актуальной для различных отраслей промышленности и народного хозяйства. Постоянно ужесточающиеся экологические требования ставят задачу повышения надежности, производительности и долговечности фильтрующих систем. Одним из их важнейших элементов являются механические фильтры тонкой и средней очистки, которые являются самым уязвимым компонентом очистительных устройств. Высокая стоимость замены загрязненных фильтроэлементов, а также необходимость остановки работы фильтра при их замене, обуславливают повышенный интерес к использованию регенерации (очистки) фильтроэлементов противотоком фильтруемой среды.

Перспективным направлением в развитии фильтрующих систем является использование фильтров со щелевой проницаемой структурой. Щелевая структура обеспечивает высокую проницаемость и возможность высокоэффективной регенерации противотоком. Существующие технологии получения щелевых фильтроэлементов имеют ряд ограничений, как по минимальной ширине получаемых щелей, так и по производительности их изготовления.

В настоящее время наблюдается тенденция преимущественного использования полимерных материалов, таких как полиэтилен, полипропилен, фторопласт и ПЭТ, для изготовления фильтроэлементов для низкотемпературной фильтрации. Это обусловлено их высокой коррозионной стойкостью, долговечностью и низкой стоимостью и удельным весом.

Таким образом, разработка новых технологий получения щелевых фильтрующих структур с шириной щелей от 10 мкм и выше на полимерных материалах является актуальной научно-технической задачей.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан новый метод механической обработки – деформирующее резание (ДР), сочетающий в себе подрезание припуска и последующее пластическое деформирование подрезанного слоя. Основные положения, теория, результаты практических исследований и практическое применение метода отражены в работах Зубкова Н.Н., Овчинникова А.И., Васильева С.Г., Кононова О.В. Метод ДР используется для получения высокоразвитых поверхностей для тепло- и массообмена, упрочнения и подготовку под нанесение покрытий на поверхности деталей, восстановления изношенных поверхностей машиностроительных деталей. Как заявлено в патенте РФ 2044606, метод ДР может быть использован также для получения щелевых фильтрующих структур.

Цель и задачи работы: Целью работы является исследование процесса получения полимерных щелевых фильтрующих труб методом деформирующего резания, а также разработка научно обоснованных рекомендаций по реализации данной технологии на металлорежущем оборудовании.

Для достижения этой цели в работе были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ возможных схем получения щелевых фильтрующих труб методом ДР и установить рациональные варианты их реализации на металлорежущем оборудовании.

2. Обосновать возможность получения регулируемых щелевых фильтрующих труб методом ДР и принципы управления их характеристиками.

3. Определить математические зависимости и разработать методику управления технологическими параметрами процесса обработки методом ДР для получения заданных геометрических характеристик проницаемой структуры.

4. Установить особенности сквозного прорезания трубных заготовок из полимерных материалов методом ДР.

5. Разработать технические требования и практические рекомендации для реализации получения щелевых фильтрующих труб методом ДР на металлорежущем оборудовании.

6. Исследовать зависимости эксплуатационных характеристик получаемых щелевых фильтрующих труб от их геометрических параметров.

7. Обосновать области рационального использования щелевых фильтрующих труб, полученных методом ДР.

Методы исследований. Решение поставленных задач осуществлялось проведением теоретических и экспериментальных исследований, разработкой технологических решений и применением полученных результатов. Теоретические и экспериментальные исследования были посвящены выявлению влияния технологических факторов обработки и геометрических параметров инструмента на характеристики получаемой щелевой структуры. Использовались основные положения теории резания металлов, технологии машиностроения, сопротивления материалов и аналитической геометрии.

Экспериментальные исследования были проведены на кафедре МТ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана на разработанной лабораторной установке с использованием современных приборов, методов и средств измерения. Эксплуатационные характеристики щелевых фильтрующих труб, полученных методом ДР, проведены в лаборатории кафедры Э-10 МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также в ЗАО «Новомет-Пермь».

Достоверность результатов исследований обеспечена корректным использованием теоретических и экспериментальных методов исследования и подтверждена сравнением расчетных и экспериментальных данных.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в выявлении закономерностей процесса ДР при сквозном прорезании стенки полимерной заготовки с целью управления параметрами получаемых фильтрующих структур. В работе получены следующие научные результаты:

1. Разработана кинематическая модель, дано математическое описание основных взаимосвязей процесса ДР при получении щелевых проницаемых структур, разработаны методики управления геометрическими параметрами получаемых фильтроэлементов.

2. Предложен способ обработки вращающимся инструментом для ДР по токарно-фрезерной схеме, позволяющий получать регулируемые фильтроэлементы с винтовыми рядами сквозных щелей.

3. Выявлены особенности обработки полимерных материалов методом ДР, а также выполнен анализ точности параметров получаемой щелевой структуры в зависимости от режимов обработки, усадки подрезанного слоя и геометрических характеристик инструмента.

4. Разработаны кинематические схемы применения метода ДР для получения щелевых фильтрующих труб, технические требования и конструкторские решения, позволяющие реализовать данные схемы на металлорежущем оборудовании.

5. Исследованы гидравлические характеристики регулируемых щелевых фильтроэлементов нового типа в зависимости от ширины сквозных щелей.

6. Проведен анализ и показана перспективность применения проницаемых щелевых труб в системах водоподготовки в качестве нижних дренажно-распределительных устройств скорых фильтров, а также в области водоочистки в качестве устройств для барботирования, в т.ч. в системах биологической очистки сточных вод.

Практическая значимость работы.

1. Разработана технология получения щелевых фильтрующих структур с шириной щелей от 10 мкм и более на полимерных материалах с помощью метода ДР. Данная технология безотходна, реализуется на стандартном металлорежущем оборудовании и имеет высокую производительность. Метод ДР позволяет также получать регулируемые щелевые трубы с возможностью точной настройки ширины щелей на заданную тонкость фильтрации от 5 мкм до единиц миллиметров, а также возможность раскрытия фильтроэлемента для увеличения эффективности регенерации противотоком.

2. Установлены особенности сквозного прорезания стенки полимерной заготовки, рациональная геометрия инструмента, технологическая оснастка. Разработаны практические рекомендации по выбору технологических параметров режима обработки в зависимости от требуемых геометрических характеристик получаемых фильтрующих труб.

3. Разработаны технические требования и предложены конструкторские решения для проектирования высокопроизводительных установок для получения щелевых фильтрующих труб. Разработана и изготовлена многоинструментальная установка на базе токарного станка 16К20, позволяющая получать щелевые фильтроэлементы из стандартных полимерных трубных заготовок.

4. Проведенные экспериментальные исследования щелевых фильтрующих труб на тонкость фильтрации доказали работоспособность и перспективность их применения для тонкой и средней очистки жидкостей от механических частиц.

Реализация работы. Результаты работы использованы в учебном процессе в МГТУ им. Н.Э. Баумана в образовательной программе специальности 1510030065 в курсе «Спецглавы механической и физико-технической обработки».

Апробация работы. Основные положения работы были доложены и одобрены на Общеуниверситетской научно-технической конференции «Студенческая научная весна», Москва в 2006 и 2007 г., Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии», Москва, 2008 г., Всероссийской научно-технической конференции: Студенческая весна 2008: Машиностроительные технологии, посвященной 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2008 г. Технология получения щелевых фильтрующих труб методом ДР удостоена диплома всероссийской выставки НТТМ-08, золотой медали IX Московского международного салона инноваций и инвестиций (2009 г.)

Публикации: По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы из 101 наименований и приложений. Работа содержит 179 страниц, в том числе 115 основного текста, 101 рисунок, 10 таблиц, а также приложений на 10 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан анализ конструкций щелевых фильтров и технологий их изготовления. Фильтрующие структуры щелевого типа имеют повышенную проницаемость и работают по принципу поверхностной фильтрации, что обуславливает высокую эффективность очистки противотоком. Эти преимущества обуславливают широкое применение щелевых фильтров в водоочистке, водоподготовке, а также в промышленности для очистки оборотных технологических жидкостей и масел. Современной тенденцией является использование регулируемых щелевых фильтроэлементов с возможностью настройки на заданную тонкость фильтрации.

Проведенный литературный и патентный обзор показал, что существует ряд технологических способов изготовления щелевых фильтров. В работе предложена классификация щелевых фильтроэлементов по способу их получения. В настоящее время щелевые фильтры изготавливают с помощью механической обработки или физико-химических методов, также используются сборные конструкции щелевых фильтроэлементов.

Методы механической обработки не позволяют получать сквозные щели шириной менее 250 мкм, что существенно ограничивает область применения данных методов для получения фильтроэлементов. Обработка резанием имеет низкую производительность и высокую сложность технологии изготовления щелевых фильтров. Высокую производительность имеет технология получения просечно-вытяжных сеток, однако возможная ширина щелей в этом случае составляет от 500 мкм и более, что обуславливает применение данных сеток

для задач грубой очистки, а также в качестве кожухов и экранов для защиты фильтроэлементов. Физико-технические методы позволяют получать щели с шириной от 3 мкм и более, однако применение данных методов ограничено низкой производительностью и высокой стоимостью обработки.

Широкое распространение получили сборные щелевые фильтроэлементы – тканые сетки с прямоугольными ячейками, плотно намотанные и сварные проволочные, пластинчатые фильтры. Данные фильтры отличаются высокой производительностью изготовления и низкой себестоимостью. Сборные конструкции могут обеспечивать ширину фильтрующих щелей от 5 мкм и более (проволочные фильтры), однако при ширине щелей менее 100 мкм они имеют низкую проницаемость. Следует отметить также невозможность регулировки данных фильтров на требуемую тонкость фильтрации.

В настоящее время существует ограниченное количество способов, позволяющих получать регулируемые щелевые фильтроэлементы. Известны фильтры с фрезерованными щелями, расположенными в шахматном порядке, а также пружинные фильтры. Однако данные фильтры имеют низкий коэффициент живого сечения и высокую конструктивную сложность и не получили широкого распространения.

Деформирующее резание (ДР) – это новый метод механической обработки, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В отличие от обычного резания, где припуск удаляется в виде стружки, метод ДР основан на подрезании и отгибке слоев материала заготовки. Подрезанный слой по своей узкой стороне остается прикрепленным к основному материалу, формируя ребра на обработанной поверхности. Метод ДР нашел свое основное применение для получения развитых поверхностей теплообменника.

Получение щелевой проницаемой структуры методом ДР предложено в патенте РФ 2044606 и дальнейших работах Зубкова Н.Н. Реализация метода ДР для получения полимерных щелевых фильтрующих труб требует теоретических и экспериментальных исследований для установления особенностей обработки полимерных материалов методом ДР, взаимосвязи технологических параметров режима обработки с геометрическими характеристиками получаемой фильтрующей структуры, разработки технологических рекомендаций по практическому применению данной технологии на металлорежущем оборудовании.

Во второй главе рассмотрены возможные схемы получения щелевых фильтрующих труб методом ДР. На основе проведенного анализа предложены оптимальные варианты их реализации на металлорежущем оборудовании. Установлены и обоснованы основные функциональные зависимости между технологическими параметрами обработки методом ДР и геометрическими характеристиками получаемых щелевых фильтрующих труб.

По результатам анализа возможных схем получения щелевых фильтрующих труб обоснована перспективность двух вариантов: обработка заготовок с внутренними продольными пазами по схеме наружного точения (рис.1а) и фрезерование на токарном станке при использовании стандартных трубных заготовок кольцевого сечения (рис.1б) при согласованном вращении

инструмента и заготовки. Характерное сечение получаемой щелевой фильтрующей перегородки представлено на рис 2.

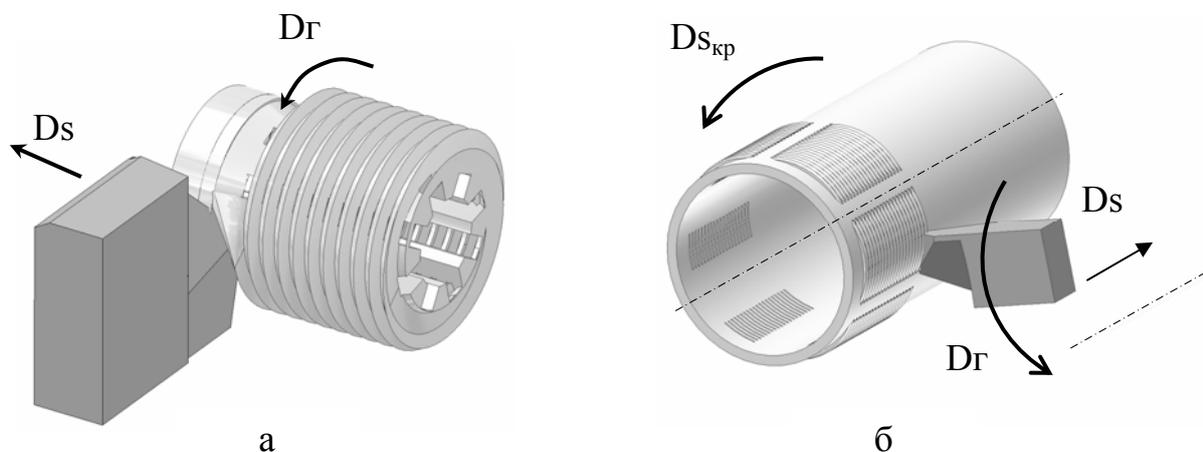


Рис.1. Схемы получения щелевых фильтрующих структур методом деформирующего резания из заготовки с продольными внутренними пазами (а) по токарной схеме и из стандартной трубной заготовки по токарно-фрезерной схеме (б)

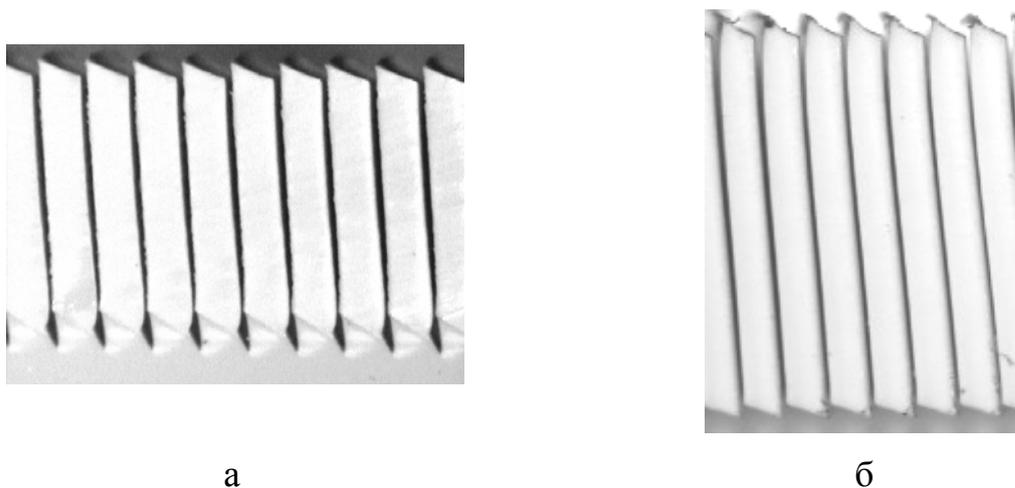


Рис.2. Щелевая структура фильтроэлемента с внутренними продольными пазами (а) и из заготовки кольцевого сечения (б)

Обработка вращающимся инструментом при синхронном вращении заготовки и осевой подаче инструмента позволяет получать ряды сквозных щелей. Количество рядов прямо пропорционально количеству инструментов (z), частоте вращения инструмента ($n_{ин}$) и обратно пропорциональна частоте вращения заготовки ($n_{тр}$).

Важнейшей особенностью данной схемы обработки является возможность получения винтовых рядов щелей. При незначительной рассинхронизации частот вращения ряды сквозных щелей будут непараллельны оси заготовки. При увеличении отношения частот вращения по сравнению с целым числом будет наблюдаться левое направление винтовых рядов, при уменьшении – правое. Такие фильтрующие трубы имеют пониженную осевую

жесткость, что позволяет им значительно деформироваться аналогично пружине (рис.3). Сжатие или растяжение трубы приводит к соответствующему равномерному уменьшению или увеличению ширины сквозных щелей, что позволяет использовать полимерные трубы с винтовыми рядами щелей как регулируемые или раскрывающиеся для очистки фильтроэлементы.

При получении фильтрующих структур требуемыми параметрами, определяющими эксплуатационные характеристики, являются: ширина сквозных щелей (b), осевой шаг щелей (p), толщина ребра (a), угол наклона ребер и, соответственно, щелей к оси трубы (ζ). Угол наклона ребер к оси заготовки определяется как сумма вспомогательного угла в плане (φ_1) и угла пружинения (ψ) ребра в сторону исходного положения, характерного при обработке термопластичных полимеров.

Наличие пластических деформаций в процессе образования ребра приводит к отличию толщины ребра (a) по сравнению с расчетной толщиной подрезаемого слоя (a_p).

Это несоответствие учитывается с помощью коэффициента утолщения ребра $\xi = a/a_p$.

Толщина ребер, формирующих фильтрующую структуру, зависит от значения подачи (S_0) и главного угла в плане (φ):

$$a = \xi \cdot S_0 \sin \varphi \quad (1)$$

Шаг сквозных щелей в осевом направлении (p) равен подаче на оборот заготовки (S_0) как в случае токарной, так и токарно-фрезерной обработки.

Ширина сквозных щелей, полученных методом ДР, определяется по формуле:

$$b = S_0 (\sin(\varphi_1 + \psi) - \xi \sin \varphi) \quad (2)$$

Фильтроэлементы должны иметь гладкие законцовки для их соединения с трубными досками, заглушками или переходниками. Получение рабочей (фильтрующей) части трубы с оставлением необработанных концов приводит к необходимости участков врезания и выхода инструмента. Появление радиальной подачи инструмента увеличивает толщину подрезаемого слоя на участке врезания и уменьшает ее на участке выхода. Это приводит к несоответствию ширины щелевого зазора на этих участках с шириной на рабочей части трубы. Разработана и экспериментально подтверждена методика, позволяющая устранить несоответствия ширины щелей на участках врезания и



Рис. 3. Принцип регулирования ширины щелей путем изменения длины фильтроэлемента

выхода инструмента заданному значению ширины сквозных щелей путем корректировки значения осевой подачи на данных участках по следующим формулам:

$$S_{0X_{вп}} = \frac{S_0 \cdot l_{вп} \cdot (1 - \sin \varphi)}{l_{вп} \cdot (1 - \sin \varphi) - t \cdot \cos \varphi} \quad (3)$$

$$S_{0X_{вых}} = \frac{S_0 \cdot l_{вых} \cdot (1 - \sin \varphi)}{l_{вых} \cdot (1 - \sin \varphi) + t \cdot \cos \varphi} \quad (4)$$

где $S_{0X_{вп}}$, $S_{0X_{вых}}$ – осевая подача на участках врезания и выхода соответственно, $l_{вп}$, $l_{вых}$ – длина участков врезания и выхода соответственно.

Установлена зависимость, позволяющая управлять получаемым углом наклона (ω) винтовых рядов щелей, определяющую жесткость фильтроэлемента, в зависимости от технологических параметров режима при получении регулируемых фильтров:

$$\omega = \arctg \left(\pi D \left(1 - \frac{z \cdot n_{ин}}{i \cdot n_{мп}} \right) / S_0 \right) \quad (5)$$

где D – наружный диаметр трубы, i – количество рядов щелей, которое равняется округленному до целого отношению $n_{ин} / n_{тр}$.

Получена зависимость изменения ширины сквозной щели по ее длине для регулируемых фильтроэлементов от угла наклона (ω) винтовых рядов щелей и технологических параметров обработки. Данная зависимость позволяет настраивать режимы обработки для получения заданной ширины щелей, а также обеспечивать требования по неравномерности ширины щели по длине.

Инструмент для ДР имеет значительные углы наклона режущей (λ) и деформирующей кромки (λ_1), следовательно в каждой точке кромок инструмента кинематические углы будут отличаться от углов заточки. Наибольшее значение для процесса ДР имеют главный (φ) и вспомогательный (φ_1) углы в плане, определяющие параметры получаемой фильтрующей структуры. Также должно выполняться условие наличия положительного главного заднего угла (α) на всей длине активного участка режущей кромки. Определение значений кинематических углов инструмента при токарно-фрезерной схеме обработки произведено с помощью математического описания рабочих поверхностей инструмента в инструментальной системе координат и перехода в кинематическую. Переход осуществлялся через матрицу, учитывающую повороты системы координат на углы σ и η , обусловленные наличием осевой и круговой подачи:

$$A_k = \begin{bmatrix} \cos \eta & 0 & -\sin \eta \\ -\sin \sigma \sin \eta & \cos \sigma & -\sin \sigma \cos \eta \\ \cos \sigma \sin \eta & \sin \sigma & \cos \sigma \cos \eta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Анализ изменения кинематических углов инструмента показал, что при токарно-фрезерной обработке наибольшее влияние на кинематические углы оказывает радиус вращения инструмента и наружный диаметр трубной

заготовки. Однако если диаметр вращения инструмента равен, или превышает диаметр заготовки, то изменением кинематических углов, кроме главного заднего (α), по сравнению с углами заточки можно пренебречь. Изменение главного и вспомогательного углов в плане не превышает в этом случае 1%. Необходима лишь проверка кинематического главного заднего угла (α), изменение которого по сравнению со статическим может составлять около 30%. В случае, если в какой-либо точке режущей кромки главный задний угол принимает отрицательные (или близкие к нулю) значения, то необходимо произвести корректировку путем увеличения статического заднего угла при заточке.

В третьей главе изложены результаты экспериментального исследования процесса получения щелевых фильтрующих структур на полимерных материалах методом ДР.

Эксперименты проводились на трубчатых заготовках из полиэтилена низкого давления ПЭ80 с наружным диаметром 50 мм и толщиной стенки 3,7 мм. Обработка велась по токарно-фрезерной схеме с получением прямых рядов сквозных щелей с использованием разработанного и изготовленного привода вращения инструмента, установленного на поперечных салазках токарно-винторезного станка 16К20. Инструмент представлял собой резцовую вставку из твердого сплава ВК8 с углами в плане $\varphi=70^0$, $\varphi_1=75^0$.

Установлено, что в случае обработки пластмасс методом ДР наблюдается явление пружинения ребер после их формообразования. При оребрении металлов угол наклона ребер равен вспомогательному углу инструмента в плане (φ_1). Однако при обработке термопластичных полимерных материалов наблюдается отклонение конечного положения ребер в сторону исходной позиции подрезанного слоя. Это объясняется отличием упруго-пластических свойств металлов и полимеров. Пружинение ребер приводит к изменению угла наклона ребер, а, следовательно, и к изменению ширины получаемых щелей по сравнению с расчетной.

Результаты экспериментальных исследований показали, что наиболее значимым технологическим параметром, влияющим на угол пружинения при обработке полиэтилена методом ДР, является только значение подачи на оборот S_0 . Для большинства случаев обработки инструментом с углами в плане $\varphi=70^0$ и $\varphi_1=75^0$ значение угла пружинения (ψ) варьируется в диапазоне от 10^0 до 20^0 , при этом уменьшение ширины щели находится в пределах 10% при различном сочетании технологических параметров. Таким образом, в большинстве случаев при обработке полиэтилена методом ДР инструментом с данными углами в плане можно задаться средним значением угла пружинения в 15^0 . Назначение вспомогательного угла в плане $\varphi_1 = 75^0$ с учетом угла пружинения $\psi=15^0$ обеспечивает получение фильтрующих щелей, перпендикулярных оси трубы. В случае необходимости точного расчета угла наклона получаемых ребер и щелей к оси заготовки необходимо использовать экспериментально определяемый угол пружинения для заданного полимерного материала и технологических параметров обработки.

Проведен анализ искажения размеров и профиля получаемой фильтрующей структуры при сквозном и несквозном прорезании стенки заготовки. Установлено, что получаемые ребра имеют трапецеидальный профиль, сужающийся к наружной поверхности трубы. Соответственно, получаемые щели, наоборот сужаются к внутренней поверхности фильтроэлемента. Обработка результатов экспериментов показала, что разница толщины ребра у основания и вершины составляет не более 5%, в то время как разница ширины щели может составлять десятки процентов. Это обуславливает дополнительные преимущества полимерных щелевых труб при фильтрации изнутри трубы наружу. Фильтрация через расширяющуюся щель исключает возможность заклинивания частиц в щелевом зазоре.

Сравнение расчетной толщины получаемых ребер и измеренной по поперечным срезам показало, что при несквозном прорезании стенки заготовки наблюдается отрицательный коэффициент утолщения ребра ξ , т.е. ребро тоньше подрезанного слоя. В случае сквозного прорезания коэффициент ξ положительный и находится в пределах от 1 до 1,05. Расчет ширины получаемых щелей необходимо производить с учетом экспериментально определяемого коэффициента утолщения ребра ξ по формуле (2).

Разработана методика корректировки параметров получаемой фильтрующей структуры для получения требуемой ширины сквозных щелей, а также угла наклона ребер к оси трубы.

Было проведено экспериментальное исследование неравномерности толщины ребра и ширины щели по ее длине при их винтовом расположении на регулируемых фильтроэлементах. Сравнение расчетных и экспериментальных данных подтвердило достоверность предложенных во второй главе зависимостей для определения параметров подрезаемого слоя и получаемых сквозных щелей в случае получения регулируемых или раскрывающихся фильтроэлементов.

В четвертой главе изложены рекомендации по практическому применению метода ДР для получения полимерных щелевых фильтрующих труб на стандартном металлорежущем оборудовании. Рассмотрены перспективные области использования получаемых щелевых фильтроэлементов.

Рекомендуется использовать режущие вставки из твердого сплава марки ВК8, закрепленные в специальной державке. В ходе многочисленных экспериментов подобрана геометрия инструмента, обеспечивающая осуществимость процесса ДР при различных сочетаниях глубины резания и подачи, прочность режущего клина, перпендикулярность щелей оси трубы, плавность входа режущей кромки в заготовку. Рекомендуемые значения угловых параметров инструмента для получения щелевых структур на полимерных материалах (полиэтилен, полипропилен, фторопласт, ПЭТ) составляют: $\gamma=59^{\circ}$, $\lambda=26^{\circ}$, $\varphi=70^{\circ}$, $\varphi_1=75^{\circ}$, $\alpha=\alpha_1=3^{\circ}$.

Проведен анализ возможности применения стандартного металлорежущего оборудования для реализации метода ДР при получении

щелевых фильтрующих труб в условиях мелко- и среднесерийного производства. При использовании трубчатых заготовок с внутренними продольными пазами рекомендуется использование токарных станков, оснащенных подвижным люнетом с шариковым подшипником, исключая трение вращающейся трубной заготовки с поддерживающей втулкой. Это позволяет изготавливать щелевые фильтрующие трубы с производительностью до 2 погонных метров в минуту. Возможно получение сквозных щелей с шириной от 10 до 500 мкм. Предложены наиболее оптимальные варианты поперечных сечений трубчатых заготовок с внутренними продольными пазами, а также разработаны требования к заготовкам.

Современные токарные станки с ЧПУ комплектуются фрезерными головками и получение щелевых фильтрующих труб требует только их дооснащения подвижным люнетом. Однако на наш взгляд, получение сквозных щелей на полимерных трубчатых заготовках стандартного кольцевого сечения целесообразно осуществлять на токарном станке, оснащенный приводом для вращения одного или нескольких инструментов для ДР. Разработана и изготовлена опытно-промышленная установка для получения щелевых фильтрующих труб на базе токарно-винторезного станка 16К20. Управление частотой вращения привода инструментов осуществляется с использованием

Таблица 1.

Характеристики установки для получения фильтрующих труб с рядами сквозных щелей на базе токарно-винторезного станка 16К20

Частота вращения заготовки, об/мин	10...1600
Частота вращения инструмента(ов), об/мин	100...2500
Диаметр блока инструментов, мм	195
Количество инструментов	1, 2, или 4
Ширина получаемых щелей, мкм	10...500
Шаг щелей, мм	0,1...5
Диаметр заготовки, мм	20...110
Длина заготовки, мм	
при наружном диаметре более 52 мм	100...1000
при наружном диаметре менее 52 мм	100...4000
Максимальная толщина стенки трубы, мм	6
Максимальная производительность, м/мин	2

частотного преобразователя Mitsubishi A700. Характеристики установки приведены в таблице 1.

Метод ДР может применяться для получения металлических щелевых фильтрующих труб из заготовок специального профиля. Возможно применение любых металлов, подвергающихся обработке методом ДР – медь, латунь, алюминий, цирконий, титан, коррозионно-стойкие стали и т.д. Перспективным является использование продольно-гофрированных заготовок, полученных вальцовкой гофрированного листа в трубу и последующей сваркой. Изготовлены опытные образцы латунных щелевых фильтров различного

наружного диаметра и шириной щелей из продольно-гофрированных сварных трубных заготовок, изготовленных по заказу ОАО «Институт Цветметобработка».

Щелевые фильтрующие трубы, полученные методом ДР, перспективны при их использовании в качестве рабочих элементов нижних дренажно-распределительных устройств фильтров. Это позволит заменить дорогостоящие и трудоемкие при монтаже щелевые колпачки и проволочные сварные фильтры на станциях водоподготовки и существенно снизить затраты на обслуживание фильтрационных установок.

Современным способом регенерации является метод фокусированной обратной промывки. Данный метод основан на периодическом сканировании внутренней поверхности фильтроэлемента специальными форсунками, которые сообщаются с атмосферой. При этом работа фильтра не останавливается и лишь небольшая часть (около 1%) очищенной воды используется для промывки фильтроэлемента. Применение метода фокусированной обратной промывки в установках на основе щелевых фильтрующих труб, полученных методом ДР, позволит увеличить эффективность регенерации, а также исключить необходимость временного отключения фильтра для его очистки.

На станциях водоподготовки и водоочистки широко используются барботирование (пропускание газов через жидкость) в различных методах очистки воды таких, как аэрофлокуляция, флотация, озонирование, дезодорация, обезжелезивание и биологическая очистка в аэротенках. Перспективным является использование полимерных щелевых проницаемых труб, полученных методом ДР, в качестве устройств для равномерной подачи воздуха (барботеров), что позволит сократить себестоимость очистных установок и повысить их надежность. Натурные испытания щелевых аэраторов, полученных методом ДР, показали, что при ширине щелей 10 мкм средний диаметр пузырьков составляет 3,5 мм, что соответствует мелкопузырчатой аэрации.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований эксплуатационных характеристик щелевых фильтрующих труб, полученных методом ДР.

Основной характеристикой фильтроэлементов является тонкость фильтрации. В ЗАО «Новомет-Пермь» были проведены испытания двух образцов регулируемых щелевых фильтрующих труб с шириной щелей в свободном состоянии 108 и 242 мкм на тонкость фильтрации. Эксперименты осуществлялись пропусканием воды с модельным загрязнителем, в роли которого служил речной песок. Далее отбирались пробы и проводился гранулометрический анализ. Результаты испытаний показали, что образцы фильтрующих труб задерживают 95% частиц с размерами, превышающими ширину щелей в свободном состоянии, что доказало работоспособность щелевых фильтроэлементов, полученных методом ДР.

На лабораторной установке кафедры «Гидравлика, гидромашины и гидропневмоавтоматика» МГТУ им. Н.Э. Баумана проведено экспериментальное определение перепадно-расходной характеристики

регулируемого щелевого фильтроэлемента при различных значениях ширины сквозных щелей. Определение данной характеристики производилось путем измерения перепада давления на фильтроэлементе в корпусе при фиксированных значениях расхода воды через него. Зависимости перепада давления на щелевой трубе от расхода получены путем вычитания аппроксимированной характеристики пустого корпуса из характеристики корпуса с фильтроэлементом. Полученные зависимости необходимы для предварительного расчета перепада давления на фильтроэлементе при заданном расходе, ширине щелей и габаритных размерах щелевой трубы, а также для подбора размеров фильтроэлемента под конкретные задачи фильтрации.

Результаты исследований осевой жесткости регулируемых щелевых фильтрующих труб позволили определить максимальные усилия в зависимости от значения осевой деформации, которые необходимы для расчета элементов конструкции фильтрационных установок.

Совместно с ЗАО «Новомет-Пермь» разработаны варианты конструкций раскрывающегося фильтра и фильтрационной установки с регулируемыми щелевыми фильтроэлементами, полученными методом ДР. Данные фильтры предназначены для использования в нефтедобывающей отрасли при очистке пластовых вод от пропанта, который применяется при гидроразрыве пластов. Рабочая тонкость фильтрации составляет 50 мкм, однако в конструкциях предусмотрена возможность настройки тонкости фильтрации от 5 мкм до единиц миллиметров.

Осевая деформация при настройке фильтрующих труб с винтовыми рядами сквозных щелей сопровождается поворотом одного торца трубы относительно другого. Таким образом, конструкция фильтра должна предусматривать возможность относительного поворота торцов фильтроэлемента. Существенно упростить конструкцию фильтров возможно за счет использования регулируемых фильтрующих труб, имеющих два участка с право- и левонаправленными рядами сквозных щелей. При осевой деформации такой трубы происходит поворот только середины фильтроэлемента. Это позволяет отказаться от использования подвижных узлов, обеспечивающих свободный поворот торцов фильтроэлемента, в конструкции регулируемых фильтрационных установок.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обоснована целесообразность и перспективность применения метода деформирующего резания для получения щелевых фильтрующих труб, в т.ч. регулируемых, из полимерных материалов с шириной сквозных щелей от 10 мкм до 500 мкм.

2. Установлено, что наиболее рациональными схемами получения щелевых фильтроэлементов методом ДР являются токарная обработка полимерных трубных заготовок с внутренними продольными пазами и обработка по токарно-фрезерной схеме в случае использования стандартных

трубных заготовок кольцевого сечения. Для обоих вариантов предложены многоинструментальные схемы обработки.

3. Токарно-фрезерная схема получения фильтрующих труб обеспечивает возможность получения фильтрующих труб с винтовыми рядами сквозных щелей. Такие трубы имеют возможность значительно деформироваться в упругой области, что позволяет регулировать ширину щелевого зазора от нуля до единиц миллиметров за счет сжатия или растяжения фильтроэлемента.

4. Предложены аналитические зависимости, позволяющие управлять процессом ДР при получении щелевых фильтрующих труб с заданными геометрическими параметрами – шириной сквозных щелей, их шагом, расположением и наклоном к оси трубы.

5. Установленные особенности реализации метода ДР при сквозном прорезании стенки заготовки позволили учесть влияние кинематики процесса на точностные показатели получаемых фильтрующих структур.

6. Экспериментальными исследованиями установлены особенности обработки полимерных материалов, в т.ч. при сквозном прорезании стенки заготовки, методом ДР. Получены экспериментальные данные по коэффициенту утолщения ребра, углу пружинения, неравномерности толщины ребра по длине, которые необходимы для расчета ширины сквозных щелей и выборе технологических параметров.

7. Разработаны рекомендации по практическому использованию метода ДР для получения щелевых фильтрующих труб из полимерных материалов, в т.ч. по конструкции инструмента, режимам обработки, требованиям к оборудованию и заготовкам.

8. Проведенные экспериментальные исследования регулируемых щелевых фильтроэлементов на тонкость фильтрации и гидравлические характеристики доказали их работоспособность в качестве устройств для средней и грубой очистки.

9. Предложены рациональные области использования щелевых фильтрующих труб в качестве фильтроэлементов дренажно-распределительных устройств фильтрующих установок водоподготовки, для фильтрации пластовых вод и барботеров в системах водоподготовки и водоочистки.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах

1. Слепцов А.Д. Фильтрующие трубы на основе сквозного прорезания стенки трубы // Студенческая научная весна – 2006: Тез. докл. общеуниверситетской конф. М., 2006. Т.3. С.38-39.

2. Зубков Н.Н., Слепцов А.Д. Получение микросеток и проницаемых щелевых труб механической обработкой // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2007. №3. С. 56-60.

3. Слепцов А.Д. Оснастка для получения полимерных фильтрующих труб // Студенческая научная весна – 2007: Тез. докл. общеуниверситетской конф. М., 2007. Т.4. С.224-226.

4. Слепцов А.Д., Зубков Н.Н. Модернизированная оснастка для получения полимерных щелевых фильтрующих труб // Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всерос. конф. М., 2008. С. 36-39.

5. Зубков Н.Н., Слепцов А.Д. Особенности кинематики процесса деформирующего резания при получении щелевых фильтрующих труб // Студенческая весна 2008: Машиностроительные технологии: Тез. докл. Всерос. конф. М., 2008. С. 57-60.

6. Зубков Н.Н., Слепцов А.Д. Получение полимерных щелевых фильтрующих труб методом деформирующего резания // Вестник машиностроения. 2010. №12. С.51-53.

7. Зубков Н.Н., Слепцов А.Д. Управление шириной щелевого зазора фильтрующей структуры, получаемой методом деформирующего резания // Электронное научно-техническое издание: наука и образование. 2011. №5. URL. <http://technomag.edu.ru/doc/182415.html> (дата обращения 03.05.2011).