



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2009–3
ОЛУ

В.Б. Протасьев¹, А.А. Тимофеев

**ОБРАБОТКА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
ВОЛНОВОГО ЭЛЕКТРОДА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ
МЕТОДОМ СТРОГАНИЯ ФАСОННЫМИ РЕЗЦАМИ**

¹Тулский государственный университет

Протвино 2009

Аннотация

Протасьев В.Б., Тимофеев А.А. Обработка рабочей поверхности волнового электрода линейного ускорителя методом строгания фасонными резцами: Препринт ИФВЭ 2009–3. – Протвино, 2009. – 8 с., 7 рис., библиогр.: 2.

Рассматриваются вопросы обработки рабочей поверхности волновых электродов линейного ускорителя с высокочастотной квадрупольной фокусировкой методами фасонного фрезерования и фасонного строгания. Обосновывается необходимость применения фасонного строгания. Приводятся недостатки метода фасонного фрезерования. Показаны результаты обработки рабочей поверхности электродов методом строгания фасонными резцами.

Abstract

Protasev V.B., Timofeev A.A. Processing of a Working Surface of a Wave Electrode of the Linear Accelerator a Planing Method Shaped Cutters: IHEP Preprint 2009-3. – Protvino, 2009. – p. 8, figs.: 7, refs.: 2.

Questions of processing of a working surface of wave electrodes of the linear accelerator with with Radio Frequency Quadrupole focusing by methods of shaped milling and shaped planing are considered. Lacks of a method of shaped milling are resulted. Necessity of application of shaped planing is proved. Results of processing of a working surface of electrodes by a planing method shaped cutters are shown.

Волновой электрод является элементом ускоряющей структуры начальной части ускорителя с высокочастотной квадрупольной фокусировкой. Структура предназначена для предварительного формирования, ускорения и фокусировки пучка заряженных частиц, поступающих из ионного источника.

Волновой электрод (**рис. 1**) имеет достаточно сложную форму, обусловленную сложностью выполняемых функций на начальном этапе ускорения.



Рис. 1. Волновой электрод.

Рабочая поверхность электрода в поперечном и продольном сечениях изменяется по длине и представляет собой поверхность постоянного радиуса в поперечном сечении и синусоидальную поверхность с модулированными амплитудой и периодом в продольном сечении. Точное изготовление продольного и поперечного профилей рабочей поверхности в заданных допусках и требованиях к шероховатости является основной задачей механической обработки электрода.

Продольный модулированный профиль рабочей поверхности задается координатами точек в соответствующей системе координат. Отклонение точек профильной поверхности от номинального расположения по нормали в тело детали должно быть не более 0,04 мм. Требуемая шероховатость поверхности – среднее арифметическое отклонение профиля $Ra = 0,5$ мкм.

Материал детали – бескислородная медь марки М0б. Технологические свойства меди М0б [1]:

- высокая пластичность и деформируемость;
- плохая обрабатываемость резанием.

До настоящего времени обработка рабочей поверхности электрода проводилась методом фасонного фрезерования на фрезерно-расточном станке с ЧПУ по программе. В качестве режущего инструмента на черновых, получистовых и чистовых проходах применялась дисковая фасонная затылованная фреза из быстрорежущей стали P18 (рис. 2).

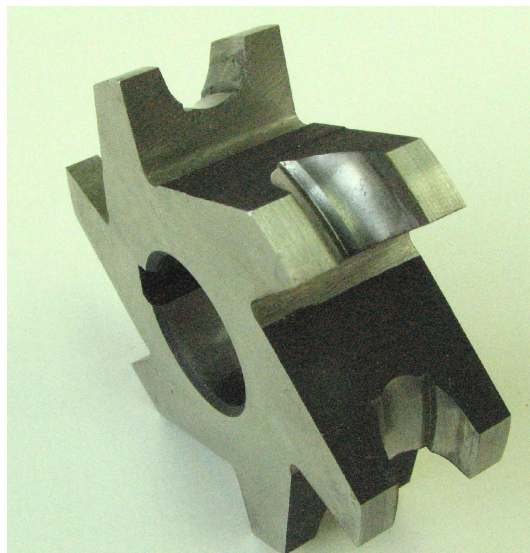


Рис. 2. Фреза фасонная.

Обработка электродов из бескислородной меди марки М0б, подвергающихся в процессе изготовления стабилизирующему отжигу, представляет определенные трудности. Бескислородная медь считается одним из наиболее труднообрабатываемых металлов из-за ее крайне вязкой структуры. При скорости резания до 70 м/мин на стадии предварительной обработки фасонной поверхности наблюдались нарост и налипание обрабатываемого материала на режущей кромке фрезы, что ухудшало состояние обрабатываемой поверхности. Чтобы предотвратить нарост и налипание на чистовых проходах, скорость резания приходилось снижать, варьируя частоту вращения фрезы и подачу в сторону уменьшения. Увеличение частоты вращения фрезы и, соответственно, скорости резания приводило к проскальзыванию фрезы без срезания припуска. Практика показала, что невозможно обработать поверхность с припуском 0,03 миллиметра и менее.

На точность профиля при обработке рабочей поверхности электрода решающим образом влияют конструкция фасонной фрезы и ее геометрические параметры, которые в любой точке режущей кромки характеризуются значениями передних и задних углов. При исследовании геометрических параметров зуба фрезы оказалось, что передние и задние углы в плоскости нормальной режущей кромки изменяются в значительном диапазоне и не соответствуют области рациональных углов для обработки высокопластичных материалов, вследствие чего нарушается условие нормальной работы режущей кромки почти по всему периметру.

Для данной фрезы было выбрано радиальное затылование, так как угловое затылование возможно только для односторонних профилей. При радиальном затыловании на боковых участках профиля нормальные задние углы недостаточны. Для обеспечения успешного процесса резания необходимо, чтобы нормальные задние углы на боковых участках профиля были не менее 4° , но для данной фрезы это условие невыполнимо. На боковых участках профиля нормальные задние углы имеют критически малые значения. В этой зоне имеются следы затирания участка задней поверхности фрезы и обрабатываемой детали.

В процессе резания инструмент контактирует с обрабатываемой поверхностью только при снятии припуска каждым из зубьев фрезы, т.е. характер обработки становится прерывистым, вследствие чего технологическая система теряет постоянное натяг, возникают вибрации, которые ухудшают состояние обработанной поверхности и вызывают повышенный износ инструмента.

В результате проведенного анализа базовой технологии изготовления волновых электродов выявлены следующие недостатки:

- условия резания крайне неблагоприятны из-за высокопластичного материала детали и несовершенной конструкции инструмента, а скорость резания слишком высока для качественного процесса удаления припуска;

- наличие эффекта наростообразования и налипания отрицательно влияет на обрабатываемую поверхность;

- рабочие передние и задние углы режущей кромки не соответствуют области рациональных углов для обработки высокопластичных материалов. Рациональные значения передних и задних углов при обработке меди должны иметь положительные значения порядка 20° , что для рассматриваемой фрезы не выполнимо;

- несовершенная конструкция инструмента вызывает искажение профиля при обработке из-за подрезов рабочей поверхности электрода;

- не достигается требуемая шероховатость обрабатываемой поверхности изделия;

- сложность изготовления и оптимальной заточки инструмента.

Погрешность изготовления волновой поверхности электрода оценивалась по результатам статистического анализа отклонений профиля направляющей линии. Реальная точность, достигнутая при изготовлении рабочей поверхности электродов, оказалась ниже требуемой, поэтому в технические требования чертежей была внесена поправка относительно отклонения точек профильной поверхности. Если ранее это отклонение составляло $-0,02$ мм, то скорректированное отклонение допускалось равным $-0,04$ мм.

Таким образом, метод обработки фасонной поверхности фрезерованием для изготовления электродов не является оптимальным с точки зрения достижения требуемых параметров рабочей поверхности. Следовательно, необходим другой метод обработки, который обеспечил бы лучшие показатели по точности и состоянию обрабатываемой поверхности. Таким методом изготовления рабочей поверхности волновых электродов может быть процесс тонкого строгания фасонными резцами по программе на станке с ЧПУ.

Процесс тонкого чистового строгания является высокопроизводительным и точным способом обработки фасонной поверхности. При чистовом строгании специальными резцами и тщательной наладке оборудования можно обеспечить точность обработки с допуском $0,02$ мм и с шероховатостью до $Ra = 0,5$ мкм [2]. Такие параметры соответствуют требованиям, которые предъявляются к рабочей поверхности электрода. Этот метод имеет следующие особенности:

- строгание – процесс динамически уравновешенный, что обеспечивает плавное срезание припуска;

- у метода нет ограничений по условиям профилирования, т.е. можно обрабатывать электродные поверхности с очень маленькими геометрическими размерами волны;

- применяемый однозубый инструмент не имеет радиального биения, что улучшает микрогеометрию обрабатываемой поверхности;

- простота изготовления и заточки инструмента.

Предлагаемая методика строгания проверялась экспериментально с использованием фрезерно-расточного станка с ЧПУ фирмы «МАНО» (Германия). **Основная задача** проводимого эксперимента – определение возможности обработки и профилирования рабочей поверхности электрода методом строгания. При проведении эксперимента решались следующие задачи:

- возможности получения рабочей поверхности, соответствующей заданным параметрам по точности профиля и шероховатости;

- нахождение оптимальных режимов резания при обработке рабочей поверхности электрода методом строгания;
- определение рациональных передних и задних углов заточки инструмента;
- выбор материала режущей части инструмента.

Программа испытаний разделена на два этапа.

На **первом этапе** эксперимента проводилось строгание резцами с прямолинейной режущей кромкой на плоской поверхности заготовки для определения работоспособности применяемой схемы обработки, оборудования и оснастки, а также для определения следующих параметров режущего инструмента и режимов обработки:

- оптимальной скорости резания;
- рациональных углов заточки режущего инструмента;
- минимальной и максимальной величин припуска на чистовых проходах.

Предлагаемая схема наладки для проведения первого этапа экспериментальной работы изображена на **рис. 3**. Схема легко реализуется на имеющемся оборудовании.

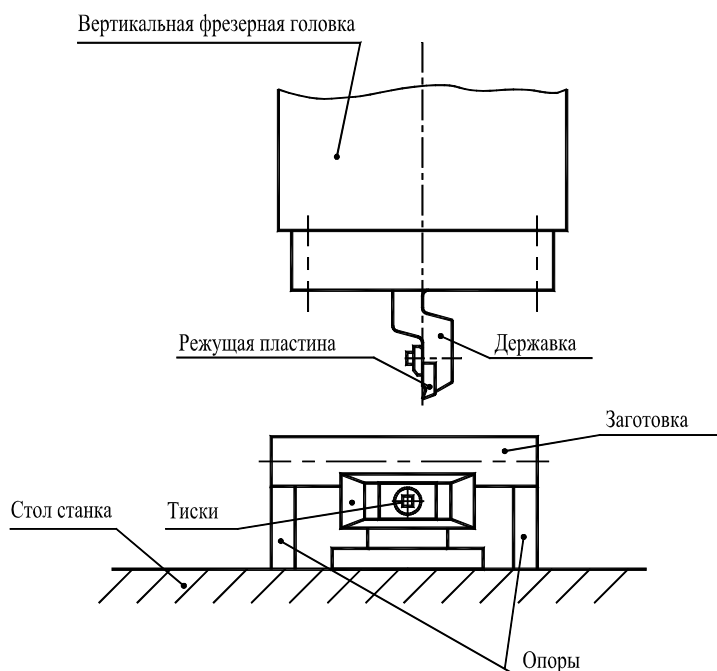


Рис. 3. Схема наладки.

Заготовка представляет собой пруток диаметром 40 мм и длиной около 300 мм из бескислородной меди марки М0б. В качестве режущего инструмента использовались пластины из углеродистой У10А и легированной инструментальной ХВГ сталей с различными сочетаниями переднего γ и заднего α углов: $\gamma = 15 \dots 30^\circ$; $\alpha = 15 \dots 25^\circ$ (**рис. 4**).

Материал режущего инструмента выбирался по следующим соображениям:

- хорошая формоустойчивость лезвий инструмента;
- возможность изготовления режущей кромки лезвия с малым радиусом округления: $\rho = 0,04$ мм при обычной заточке и $\rho = 0,002$ мм при доводке;
- высокая механическая прочность на изгиб;
- отсутствие требования теплостойкости, так как обработка ведется с малыми скоростями резания;
- дешевизна и доступность материала в конкретных условиях производства.

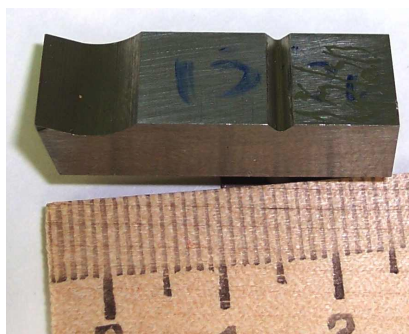


Рис. 4. Резец.

Обработка проводилась без применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), так как применение СОТС отрицательно влияет на физико-химическое состояние обработанной поверхности, на которой образуется эмульсионная плёнка, что недопустимо. Управление процессом обработки производилось с помощью двух параметров – минутной подачи S_m , мм/мин, и припуска t , мм (глубины резания). Скорость резания варьировалась в диапазоне от 0,1 до 4,0 м/мин, а припуск назначался в пределах 0,005...0,3 мм.

На протяжении всего эксперимента передняя и задняя поверхности резцов оставались чистыми без нароста и налипания стружки. Практически во всем диапазоне скоростей резания наблюдалась стружка, характерная для нормального протекания процесса.

Для того чтобы защитить лезвие инструмента от сколов и выкрашивания, повысить его стойкость, а также улучшить состояние обработанной поверхности, острая кромка режущей пластины из ХВГ была притуплена фаской. Ширина фаски затупления не превышала 0,05 мм. Доводка режущей кромки проводилась алмазным кругом вручную.

В результате проведения дополнительного опыта было установлено, что применение резцов из стали ХВГ с притупленными режущими кромками улучшило процесс строгания: уменьшилась волна на обработанной поверхности.

На основе анализа полученных результатов первого этапа эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. На чистовых проходах скорость резания не должна превышать величины $V_{рез} = 0,4$ м/мин.
2. Резцы изготавливать с рациональными углами заточки режущего клина $\alpha = 20^\circ$ и $\gamma = 20^\circ$.
3. Экспериментом установлена возможность строгания с очень малыми величинами припуска, менее 0,01 мм. Ранее при фрезеровании волновой фасонной поверхности снятие припуска 0,04 мм и менее вызывало серьезные трудности, так как режущая кромка зуба фрезы заминала обрабатываемую поверхность, а не срезала припуск. Таким образом, разрешающая возможность способа строгания выше, чем фрезерование.
4. При тонком чистовом строгании необходимо назначить глубину резания за один проход не более 0,05 мм.
5. Полученное среднее значение параметра шероховатости в продольном направлении $Ra = 0,143$ мкм, что существенно лучше, чем соответствующее требование чертежа; шероховатость в поперечном направлении $Ra = 0,406$ мкм соответствует требованиям чертежа. Возможно уменьшение параметра шероховатости с помощью мероприятий по доводке режущей кромки.

На **втором этапе** эксперимента проводилась обработка образца для получения рабочей поверхности электрода с помощью фасонных строгальных резцов. **Целью** второго этапа является:

- получение рабочей поверхности волнового электрода с заданными параметрами по точности и шероховатости поверхности;

- разработка рекомендаций по выбору режимов процесса резания при обработке фасонной поверхности из бескислородной меди, учитывающих трансформацию рабочих углов фасонного резца.

Схема наладки приведена на **рис. 5**. Станочное оборудование такое, как и при проведении первого этапа эксперимента – фрезерно-расточной станок с ЧПУ фирмы «МАНО». Конструкция специальной пружинящей державки для фасонного строгания исключает отрицательную жесткость резца.

Режущий инструмент – фасонный резец – выполнен с учетом экспериментальных данных и соответствующих рекомендаций в виде пластин из двух марок инструментальных сталей ХВГ и 9ХС с углами заточки $\alpha = 20^\circ$ и $\gamma = 20^\circ$ (**рис. 6**). Задняя поверхность фасонного резца образована электроэрозионной обработкой с помощью станка модели «AGIECUT 200» фирмы «AGIE» (Швейцария). Нормальные задние углы α_H выдержаны постоянными по всему профилю резца. Шероховатость передней и задней поверхностей резца не ниже $Ra = 0,25$ мкм. Радиус округления режущей кромки r имеет значение 0,005 мм.

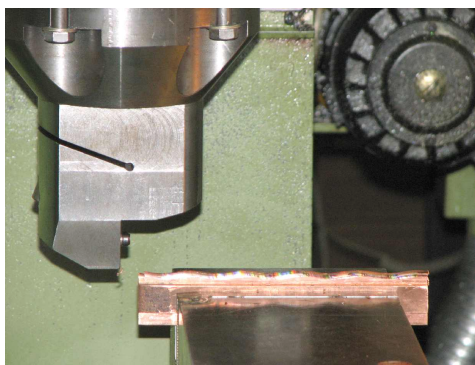


Рис. 5. Схема наладки.

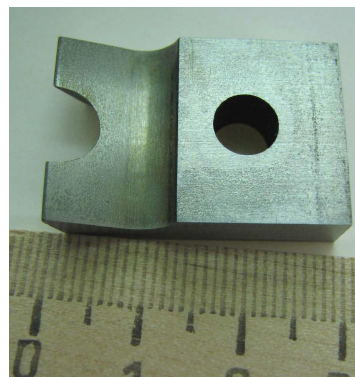


Рис. 6. Фасонный резец.

На втором этапе эксперимента моделировались реальные условия работы фасонного резца. Для изготовления опытного образца использовалась заготовка в виде пластины длиной 210 мм и толщиной 8 мм из бескислородной меди марки М0б. Толщина и длина обрабатываемого участка опытного образца соответствуют геометрическим параметрам реального электрода. Координаты основных и промежуточных опорных точек продольного профиля рассчитывались по программе «MATHCAD». Управляющая программа с рассчитанными параметрами траектории движения инструмента создана с помощью программы «PEPS».

Режимы, условия и характер работы инструмента при испытании ничем не отличались от условий его работы при эксплуатации. При обработке оценивались: состояние обрабатываемой поверхности и режущего инструмента; характер и состояние образующейся стружки; уточнялись окончательно параметры режимов резания для чистовых проходов.

Для получения более полных данных по стойкости режущей кромки обработка проводилась от начала до конца эксперимента одним резцом из стали ХВГ без применения СОТС.

Чистовая обработка полного профиля происходила с начальным значением скорости резания $V_{рез} = 0,7$ м/мин, и далее снижалась до $V_{рез} = 0,4$ м/мин. Припуск на всех чистовых проходах не превышал значения $t = 0,01$ мм. Наилучшие результаты наблюдались в диапазоне скоростей резания $V_{рез} = 0,15 \dots 0,08$ м/мин. В целях определения возможности способа строгания удалялся припуск около 0,005 мм, при изменении скорости резания в пределах значений от

$V_{рез} = 0,04$ до $0,15$ м/мин. Наиболее приемлемой для чистовых проходов резца была принята скорость резания $V_{рез} = 0,08$ м/мин.

В результате обработки получена реальная поверхность с точностью, не превышающей значения $0,02$ мм, и шероховатостью $Ra = 0,4$ мкм, что соответствует предъявляемым требованиям (рис. 7).



Рис. 7. Опытный образец.

По результатам экспериментов можно сделать следующие **выводы**:

1. Экспериментально подтверждена возможность обработки сложной поверхности электрода методом строгания фасонными резцами из инструментальных сталей марок ХВГ и 9ХС.

2. Чистовое строгание обеспечивает точность обработки поперечного и продольного профилей изделия с допуском $0,015$ мм.

3. Стругание может проводиться с очень малыми величинами припуска $0,005$ мм и менее.

4. Стругание позволяет вести непрерывную обработку фасонной поверхности, улучшая микрогеометрию поверхностного слоя, в отличие от метода фрезерования, который носит прерывистый характер обработки, что отрицательно сказывается на состоянии обработанной поверхности.

5. Значительно сокращается путь, проходимый резцом при строгании, по сравнению с фрезерованием, что должно увеличивать стойкость режущего инструмента.

5. В ходе отработки нового метода определены рациональные геометрические параметры режущего инструмента.

6. Эксперимент показал, что в диапазоне скоростей резания от $0,08$ до $0,7$ м/мин состояние стружки при строгании характеризует процесс резания как нормально протекающий. Образуется сливная стружка, имеющая чистую и блестящую контактную поверхность без задиrow и других дефектов.

7. При скоростях резания менее 1 м/мин отсутствует явление наростообразования и налипания стружки. Передняя контактная поверхность инструмента оставалась чистой на протяжении всего времени эксперимента.

8. Фасонное строгание электродной поверхности опытного образца полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям в отношении точности профиля и состояния обработанной поверхности. Этот метод применим на чистовых проходах для получения максимально точного профиля рабочей поверхности с низкими параметрами шероховатости. В качестве предварительной обработки, где не требуется получение высокоточного профиля, допустимо применять метод фасонного фрезерования как хорошо отработанный способ получения фасонной поверхности.

Авторы выражают благодарность О.К. Беляеву за помощь, советы и замечания, высказанные при обсуждении данной работы.

Список литературы

[1] **Осинцев О.Е., Фёдоров В.Н.** Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с., ил.

[2] **Справочник технолога-машиностроителя.** В 2-х т. Т1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение–1, 2003. 912 с., ил.

Рукопись поступила 2 апреля 2009 г.

В.Б. Протасьев, А.А. Тимофеев.

Обработка рабочей поверхности волнового электрода линейного ускорителя методом строгания фасонными резцами отходов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы *Word*.

Редактор Н.В. Ежела.

Подписано к печати 02.04.2009. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.

Печ.л. 0,75. Уч.–изд.л. 0,9. Тираж 80. Заказ 11. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2009-3, ИФВЭ, 2009
