

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ГИДРОРЕЗКИ И ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

*Мендалиева С.И., Косатбекова Д.Ш.,
Акулович Л. М.*

Аннотация

В статье рассматриваются технология и оборудование гидрорезки и гидроабразивной обработки металлов. Приведены кинематическая схема устройства гидрорезки металла и других материалов. Рассматриваются модели станков для гидрорезки наиболее известных мировых брендов. В качестве новизны исследования можно отметить эффективность разрезания толстостенных материалов гидроабразивной резкой и приведенные зависимости скорости резания от толщины разрезаемого металла для различных материалов. По результатам исследований выявлено минимальное тепловыделение, которое обеспечивает точный рез материалов и экономичность по сравнению с плазменной обработкой материала.

Ключевые слова: гидрорезка, гидроабразивная обработка, нетрадиционные методы обработки, механическое воздействие, водоструйная резка, микроразрушение обрабатываемого материала.

Введение

В современном машиностроении очень часто к качеству реза металлов предъявляются высокие требования, что не дает возможности использовать традиционное оборудование: гильотины или плазменную резку. Резка металла водой (другие названия это «гидрорезка», «водорезка», «водоструйная» или «гидроабразивная резка», а также «ватер джет» от английского «waterjet») применяется с 60-х годов прошлого века.[1, с.33]

Впервые гидроабразивный метод был использован для раскроя металла авиастроительной компанией США. Позже компания

официально заявила о том, что данный метод является оптимальным для резки металла и других высокопрочных материалов. Сейчас необходимо заметить, что американские компании являются лидером в области использования «waterjet». [1, с.34]

Именно во время прибывания стажировки в Университете Калифорния Дэвис, Штат Калифорния мы более детально ознакомились с процессами современных методов резки металла. Профессора и докторанты этого университета в реализации научных проектов используют новейшие методы обработки, такие как лазерная резка или гидрорезка. Во

время прохождения стажировки мы изучали основные принципы работы и преимущества гидрорезки и гидроабразивной обработки металлов.

Изначально считалось, что эта технология предназначена исключительно для промышленности или специализированных предприятий. Но сегодня она применяется на всех предприятиях, использующих механическую обработку. Технологией гидроабразивной резки пользуются компании таких отраслей, как машиностроение, авиация, медицина, пищевая промышленность и множество других.

Гидроабразивная резка лишь на одной установке на предприятии может значительно увеличить его существующие производственные возможности.

В зависимости от того, что режет материал, чистая вода или вода с добавлением абразивного вещества различают гидрорезку (водоструйную) и гидроабразивную резку. В каждом случае вода, проходя под чрезвычайно высоким давлением через узкое отверстие в режущей головке, располагаемой над разрезаемым материалом, осуществляет его резку. Размер отверстия выбирается в зависимости от плотности материала. Легко проницаемые материалы можно резать головками с небольшими отверстиями (от диаметра 0,08 мм), а твердые материалы могут потребовать отверстий диаметром до 0,8 мм. [2, с.231]

Материалы и методика исследований

Главным отличием, которое имеет гидроабразивная резка металла, от остальных способов резки листового металла является то, что на материал не оказывается механическое воздействие. Отсутствие трения, нагревания инструментов влияет на качество реза и возможные сферы применения. Гидроабразивная резка металла струей чистой воды или абразивной смеси успешно применяется и для разрезания следующих материалов:

1. Мрамор, гранит, камень и другие горные породы.
2. Стекло, керамика.
3. Стали и металлы, включая: титан, нержавейку.
4. Железобетон.
5. Пластик, текстолитовые, эбонитовые и паронитовые плиты, резину.

При таком методе разрезания удается достичь минимального расхода строительных материалов, комплектующих, и т. д. На предприятиях с повышенной пожаро и взрывоопасностью, гидроабразивные станки являются единственным возможным оборудованием, соответствующим требованиям для проведения работ.

Абразивная водная струя может резать практически все. При этом процессе абразив, обычно гранат, втягивается в поток струи по принципу действия трубки Вентури. Только около 60% граната реально осуществляет резку, остальное вымывается неиспользованным. Однако это соотношение зависит от ряда факторов. Обычно с

увеличением скорости резки увеличивается количество частиц, реально осуществляющих резку, но уменьшается возможная глубина резки материала. Давление обычно находится в пределах от наименьшего значения 140 МПа до максимального 420 МПа. На некоторых установках создается давление до 630 МПа. Этот процесс может конкурировать с электроэрозионной, плазменной и лазерной обработкой.

Хотя гидроабразивную резку можно использовать для любых материалов, наиболее распространенная толщина резания составляет около 50 мм. В любом случае от толщины зависят время и точность реза. Точность обработки может достигать 0,03 мм, хотя чаще всего она колеблется в пределах 0,08 - 0,13 мм. Ширина реза или диаметр струи составляет 0,5 мм при гидроабразивной резке и 0,8 мм при резке чистой водой. [3, с.247-248]

Возможно достижение более жестких допусков при условии тщательного контроля оператором внутреннего диаметра фокусирующей (или направляющей) трубки. Под воздействием абразивной водяной струи диаметр этого отверстия увеличивается вследствие эрозии. Программные

средства позволяют предупредить момент перехода к критическому значению внутреннего диаметра, однако самый верный способ заключается в тестировании.

Скорость резки меняется в зависимости от рабочих параметров и разрезаемого материала. По данным инженеров фирмы Flow International, типичная скорость резки материала толщиной 25 мм из мягкой стали колеблется от 97 мм/мин при резке под давлением струи 385 МПа до 213 мм/мин при давлении 420 МПа. [4, с.395]

Общее правило заключается в том, что с увеличением скорости резки ухудшается качество реза, но его можно улучшить, повышая мощность насоса.

Работа гидроабразивной резки основана на технологии подачи воды с определенным содержанием абразивного вещества под давлением, на поверхность материала. Во время резки вода подается из специального резервуара под давлением в смеситель. Одновременно в смеситель направляется абразив, обычно представляющий мелкие частицы песка. На рисунке 1 представлен принцип работы гидроабразивной резки.

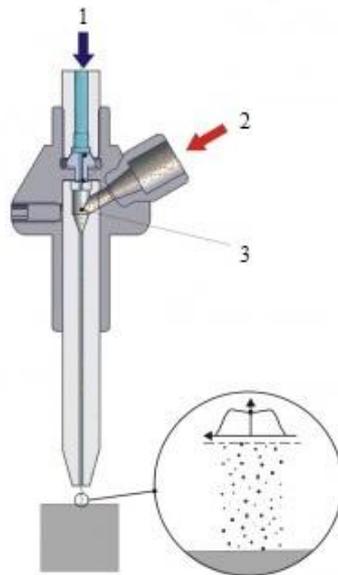


Рисунок 1 – Принцип работы гидроабразивной резки 1 – вода под высоким давлением, 2 – абразивный порошок, 3 – узел смешивания

После смешивания с абразивом, уже не вода, а абразивная смесь подается на сопло для резки металла гидроабразивной струей воды. Тонкая струйка направляется на поверхность обрабатываемого материала. Во время столкновения с разрезаемым материалом кинетическая энергия струи преобразуется в механическую энергию микроразрушения обрабатываемого материала, и происходит резание.

Основным параметром процесса резки водой является скорость резания, которая превышает 900 м/с. Когда струя поступает на поверхность заготовки, эрозионная сила водяной струи выполняет функцию резака. В этом случае вода действует как пила и создает узкий паз в материале заготовки. Рассмотрим схему устройства, предназначенную для резки материала водой (рисунок 2).

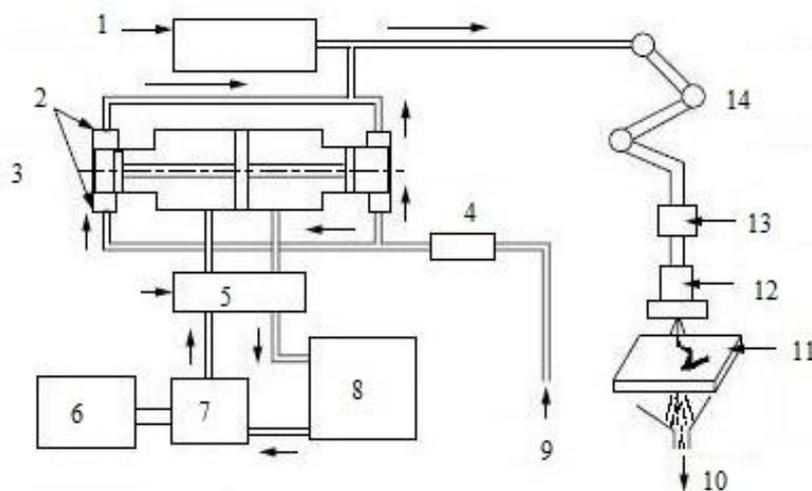


Рисунок 2 - Схема системы резания водой.

1 – аккумулятор, 2 – обратный клапан, 3 – усилитель, 4 – фильтр, 5 – распределитель, 6 – двигатель, 7 – насос, 8 – масло, 9 – подача воды, 10 – слив, 11 – заготовка (рабочая поверхность), 12 – сапфировое сопло, 13 – пуск, старт, 14 – водопровод

Главными частями устройства являются гидравлический насос, 30-киловаттный (кВт) электродвигатель, усилитель давления воды, аккумулятор и сопло. Чтобы обеспечить необходимое для резки давление воды используется гидравлический насос с усилителем, который принимает воду при низком давлении (3-4 бар) и выводит его при сверхвысоком давлении (до 3800 бар). Усилитель преобразует энергию гидравлической жидкости под низким давлением в жидкость сверхвысокого давления. Поршень двустороннего действия подвергается давлению до 210 бар, совершает возвратно-поступательное движение и повышает в конечном итоге давление воды до нескольких тысяч бар. Концевой выключатель, расположенный на каждом конце хода поршня, дает сигналы электронного управления для смещения гидрораспределителя и изменения направления поршня. Сборочные усилители с плунжером, расположенные с каждой стороны поршня, создают давление воды и подают ее с двух сторон в аккумуляруемую емкость. Одна сторона усилителя находится на впуске, противоположная сторона генерирует выходное сверхвысокое давление жидкости. На входе фильтрованная вода поступает в цилиндр высокого давления. После

того, как плунжер меняет направление, вода сжимается и выходит под сверхвысоким давлением. [5, с.328]

Как было сказано выше, процесс резки может осуществляться либо чистой водой, либо с добавлением абразива. Чтобы продлить сроки эксплуатации и обеспечить необходимые условия для точной и качественной обработки материала необходимо, чтобы жидкость была чистой. Для этого из воды посредством фильтрации убирают все неоднородные частицы.

Гидравлический насос обеспечивает изменение давления в определенном диапазоне. Это зависит от материала и режима резки, который изначально задается. Он также обеспечивает необходимое давление, в случае, если работает несколько режущих станций для повышения производительности обработки. [5, с. 331]

Колебания давления гасятся в аккумуляторе давления большой емкости, что гарантирует практически свободную от пульсации струю воды. Модуль для генерации струи по гибким трубам высокого давления можно подавать практически в любую произвольную точку.

В режущей головке энергия давления воды преобразуется в кинетическую энергию водной струи. Проходя через сопло,

изготовленное из рубина, сапфира или алмаза, вода ускоряется до 3-кратной скорости звука с образованием тонкой сфокусированной струи, служащей в качестве инструмента для резки материала. Сопла резки могут меняться в зависимости от толщины обрабатываемого материала, его плотности, а также от состава жидкости, используемой во время разрезания.

Высокая износостойкость алмазных (SD) инструментов позволяет устройству многократно использовать один инструмент. Тем не менее, время от времени необходимо заменять сопло.[6, с.305-307] В случае, если материал режется с добавлением абразива (рисунок 1) необходимо использовать смеситель. Смеситель - это оборудование гидроабразивной обработки с целью получения эффективной смеси, путем смешивания абразивного материала и воды. Он является одним из важнейших частей гидроабразивного станка. Именно смесительный узел отвечает за качество получаемой смеси, от равномерности которой, зависит толщина реза и отсутствие сколов на поверхности.

Важным критерием качества резки является конусность резки. Как правило, современные гидроабразивные станки оснащены автоматическим устройством, компенсирующим конусность кромки, возникающая вследствие инерционности струи воды. Конусность прямо пропорциональна скорости разрезания. Чтобы уменьшить этот негативный эффект

используется компенсация конусности при резке (например, Flow Dynamic Waterjet и подобные технологии).[7, с.210]

Принцип компенсации конусности заключается в том, что автоматика самостоятельно определяет качество и плотность материала и дает указание режущей головке на смену угла сопла.

Таким образом, метод резки водой или гидроабразивная резка позволяют существенно увеличить скорость и качество реза материала. С экономической точки зрения, расход материала и энергии значительно понижается (на 20-30%), за счет использования при таком методе энергии воды в качестве режущего инструмента. Расходным материалом здесь является только вода и абразивный материал. Наиболее дорогостоящим расходным материалом можно считать вид абразива и меняющееся через определенное время сопло. Практика показывает, что данный метод экономичен, экологичен, имеет ряд преимуществ.

Оборудование для гидроабразивной резки

Мировыми лидерами в производстве установок для гидроабразивной резки являются следующие компании: Flow (США), OMAX (США), Jet Edge (США), PTV (Чехия), Waterjet Sweden, Resato (Голландия), Bystronic (Швейцария), Caretta Technology (Италия), ALICO (Финляндия). [8, с.260]

В процессе производства станков на этих заводах используются самые качественные и

надежные узлы и запчасти производства компаний KMT, AccuStream (насосы ультравысокого давления, режущие головки, устройства подачи абразива и т. п.), а также UNDE, Thueringer, BHDT.

В настоящее время изготовителями выпускаются в основном гидроабразивные станки с числовым программным управлением (ЧПУ). Одним из наиболее модернизированных станков последних лет является

станок гидроабразивной резки Flow Mach 4, который имеет модульную конструкцию и объединяет в себе все необходимые для работы компоненты (рисунок 3). Благодаря этому обеспечиваются максимально комфортные условия его эксплуатации и простой доступ ко всем рабочим узлам. Flow Mach 4 используется для решения самых разнообразных задач по раскрою материалов.[8, с.265]



Рисунок 3 - Гидроабразивный станок Flow Mach 4

Применение станков гидроабразивной резки не ограничивается только возможностью раскрою металлопроката, все же основная доля оборудования продолжает применяться непосредственно в этой сфере производства.

Возможности использования программируемых станков с ЧПУ для гидроабразивной резки нержавеющей стали, алюминия,

меди, других типов черных и цветных металлов разной прочности, позволили существенно увеличить и расширить сферы применения оборудования. Благодаря станкам с ЧПУ обеспечивается производство точных деталей с минимальным отклонением от заданных размеров, что практически невозможно достичь традиционными способами резки.(рисунок 4)



Рисунок 4 - Гидроабразивный станок с ЧПУ

Принцип работы гидроабразивного оборудования с ЧПУ сводится к следующему:

- Устанавливается программное обеспечение для гидроабразивной резки на станках с ЧПУ. Для каждого материала есть свое ПО, автоматически подбирающее состав режущей смеси, давление струи и другие необходимые параметры. Программа позволяет предусмотреть фигурную резку материала.

- Дополнительная обработка - обычно после обработки материала с помощью станка, таковая не требуется. Но при неправильном подборе состава режущей струи может наблюдаться небольшая шероховатость поверхности после ГАР. Шероховатость реза практически исключается при использовании станков с программным обеспечением. Станок с ЧПУ анализирует качество реза и автоматически корректирует выбранный режим.

- Помимо разрезания материала, станок для

гидроабразивной резки металла с ЧПУ позволяет высверливать отверстия необходимого диаметра. Некоторые гидроабразивные станки с ЧПУ содержат дополнительное оборудование для проведения определенных операций.

- После обработки заготовки получается полностью готовая деталь, не требующая дополнительных работ по шлифовке или доработке места резки.

Наиболее известное оборудование для гидроабразивной резки Waterjet Sweden AB (Швеция) является европейским лидером по производству высокотехнологичных прецизионных установок гидроабразивной резки. [9, с.430]

Оборудование WaterjetSweden производит установки гидроабразивной резки с крупногабаритной поперечной балкой, которая быстро и легко перемещается и работает с максимальной точностью. [10, с.895] Для своих машин компания WaterjetSweden использует только высококачественные комплектующие, увеличивающие

срок службы установок гидроабразивной резки. Первая машина, созданная основателем компании Я.Ридом в 1975 году для компании "Forlaget Karnan", до сих пор используется в производственных условиях, сохраняя заданную точность. Размеры стола в стандартном

модельном ряду WaterjetSweden колеблются от 1050 мм x 1150 мм до 4200 мм x 11500 мм.

Основные технические характеристики некоторых установок гидроабразивной резки WaterjetSweden приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики некоторых установок гидроабразивной резки Waterjet Sweden

Модель машины	NC 1010 B	NC 3015 E (B)	NC 4020 E(B)	NC 2560 S
Размер стола, мм	1050x1150	3200x1750	4200x2275	2700x6700
Зона резания, мм	950x1010	3100x1510	4100x2010	2510x6470
Диапазон перемещений по осям X, Y, Z	950 1010 175	3010 (2250) 1510 175	4010(3010) 2010 250	2510 6470 175 или 250
Точность позиционирования	±0,05 мм/ 1000 мм	±0,05 мм/ 1000 мм	±0,05 мм/ 1000 мм	±0,075мм/ 1000 мм
Точность повторения, мм	±0,025	±0,025	±0,025	±0,025
Скорость подачи по осям X-Y, мм/мин	0 ... 12 000	0 ... 10 000	0 ... 12 000	0 ... 10 000
Скорость подачи по оси Z, мм/мин	0 ... 4 000	0 ... 4 000	0 ... 4 000	0 ... 4 000
Мин. возможное расстояние между соплами, мм	90	90	90	-
Макс. возможное расстояние между соплами, мм	500	400 (1500)	400(2010)	-

Для повышения производительности, установки гидроабразивной резки Waterjet Sweden оборудованы несколькими режущими головками, расположенными либо независимо друг от друга на одном портале либо на одном широком суппорте.

CNC-управляемые оси X, Y, Z - стандарт для всех установок гидроабразивной резки Waterjet Sweden. Кроме того, компания выпускает установки с 4-мя и 5-тью управляемыми осями, позволяющими осуществлять

сложную резку деталей из листового материала; например, вырезку деталей с внутренними и наружными фасками по любым криволинейным поверхностям, вырезку наклонных отверстий любого профиля с прямолинейной образующей и обработку сложных криволинейных пазов.[11, с.913] Помимо 4-х и 5-ти координатной резки деталей из листового материала, реализуемых с помощью режущей головки Beveljet, Waterjet Sweden выпускает станки для объемной 5-ти координатной

гидроабразивной резки, имеющей возможность направлять гидроабразивную струю под любым углом к поверхности стола, в том числе горизонтально.

Помимо изготовления машин для гидроабразивной обработки, компания Waterjet Sweden занимается модернизацией, разработкой и применением собственных передовых технологий гидроабразивной резки.

В силу огромного опыта работы в области гидроабразивной

резки Waterjet Sweden обладает оборудованием, технологией и программным обеспечением, которые обеспечивают исключение образования конусности при 3-х координатной обработке.

Скорости резания некоторых материалов, достигаемых с помощью систем Waterjet Sweden, приведены на рисунке 5. При этом толщина разрезаемого материала может достигать порядка 300 мм.

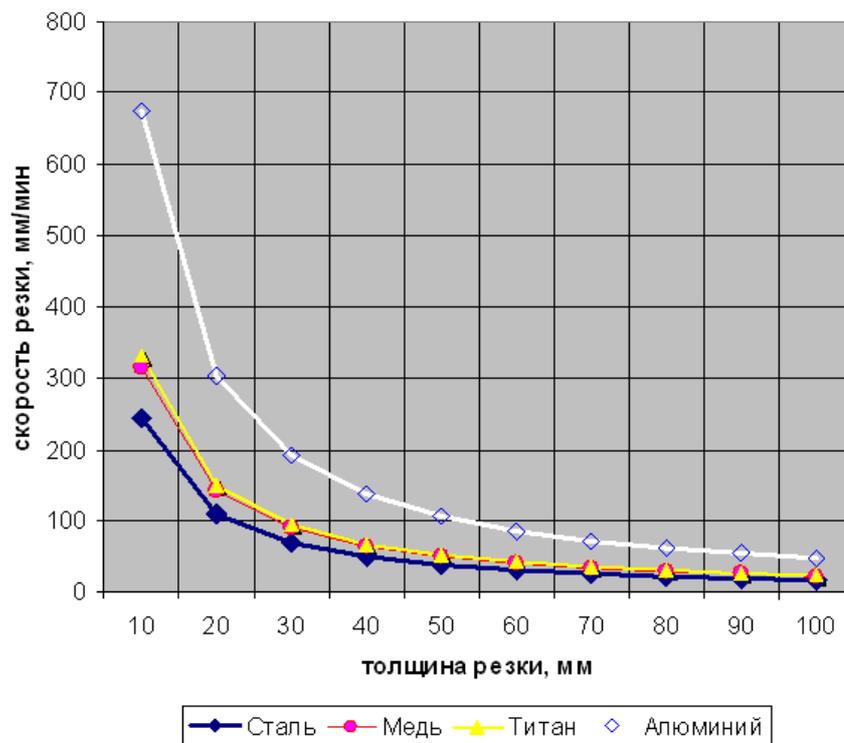


Рисунок 5 - Скорость резания некоторых материалов.

Станки резки металла узконаправленной струей воды с абразивом можно использовать в металлопрокате. [12, с.131-132] Так максимальная толщина металла при резке гидроабразивным оборудованием составляет 20 см для среднеуглеродистой стали, 15-17 мм для титана, 12 мм для особых высокопрочных сплавов. Скорость

резания при толщине свыше 80 мм у образца титана и стали практически совпадают. Это объясняется похожей структурой титана и высокопрочных сталей, а также приближенным значением твердости. Минимальный коэффициент приходится на долю меди и составляет всего 4-5 мм.

Возможности гидроабразивной резки

1. Уникальный способ обработки материала с помощью узконаправленной струи воды под давлением нашел свое место во многих сферах производства и искусства. Одним из основных преимуществ гидроабразивного метода резки является полное отсутствие сколов, и нагревания поверхности, присутствующие при обычном разрезании предметов. Благодаря современным технологиям и усовершенствованию станков удалось расширить их функциональные возможности и сферу применения.

2. Возможность выполнить нестандартную резку материала.

Причем изменение наклона реза не влияет на качество разрезания. Точность резки металла под углом позволяет использовать полученные заготовки без дальнейшей обработки.

Существуют станки, которые в состоянии работать в полностью автономном режиме без участия человека. При этом требуется, чтобы была выставлена определенная программа, которая и регламентирует работу оборудования. На рисунке 6 представлены возможности вырезания сложных деталей с помощью программного управления на станках гидроабразивной резки. [13, с.210-213]

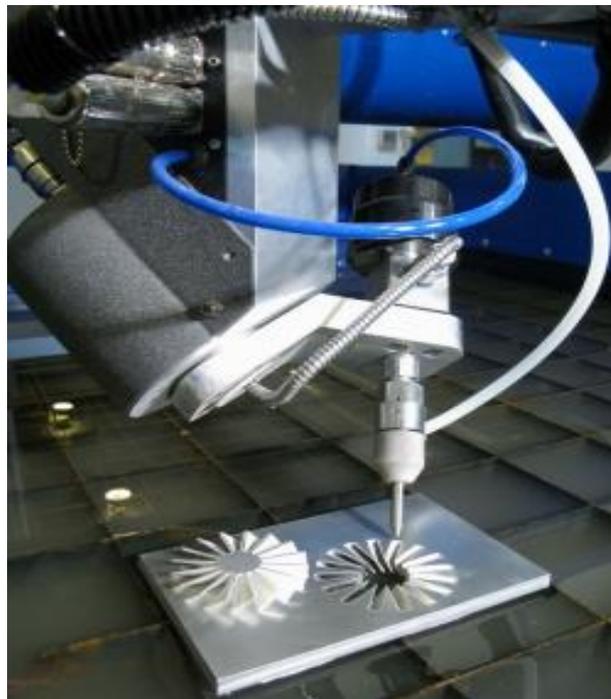


Рисунок 6 – Резка деталей со сложной геометрией.

Точная фигурная гидроабразивная резка металла позволяет использовать станки при

производстве предметов украшения, декоративных элементов и много другого. Качество реза и точность

выполнения фигур во многом зависит не от опыта рабочего, а от качества используемого оборудования и программного обеспечения.

Заключение

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы и отметить новизну:

1. Минимальное тепловыделение обеспечивает точный рез материалов, поддающихся деформированию под воздействием высокой температуры.

2. Технологичность процесса реза - станок является полностью универсальным, при необходимости можно использовать для сверления. Существует возможность выполнения операции независимо от атмосферных и других условий. Ручные установки могут быть использованы для разрезания материала даже под водой или на глубине до нескольких сот метров.

3. Экономичность по сравнению с плазменной обработкой материала - плюсы водно-абразивной резки очевидны.

6. .

Скорость разрезания может достигать 30000 мм/ мин. Причем это не влияет на качество реза. Если учесть что при разрезании теряется всего 0,5-1 мм материала, а также точность и полное соответствие готовой продукции задаваемым размерам, становится очевидным высокая рентабельность установки ГАР.

4. Безопасность - станки могут устанавливаться даже на производстве с повышенной взрывоопасностью, при изготовлении легковоспламеняющихся материалов. Отсутствие нагревания поверхности, вероятности возникновения искры и другие характеристики делают применение водно-абразивных станков максимально удобным и безопасным.

5. Новизной исследования можно считать заключение о возможности разрезания толстостенных материалов и получение теоретических зависимостей скорости резания от толщины для нескольких видов металлов

Список литературы

1. El-Hofy, H. "Advanced machining processes. Nontraditional and Hybrid machining processes". TheMcGraw-Hill Companies, Inc.2005.pp. 32-46
2. Lal, G.K. and Choudhury, S.K. "Fundamentals of manufacturing processes". Harrow, U.K.: Alpha Science International Ltd.2005. pp. 231-245
3. Byers, P.J. "Metalworking fluids" 2nd edition. Boca Raton, London, New York: CRC Press/ Taylor and Francis group. 2006. pp. 247-273
4. Youssef, H.A. and El-Hofy, H. "Machining technology. Machine tools and operations". Boca Raton, London, New York: CRC Press/ Taylor and Francis group. 2008, pp.391-495
5. Wickert, J. and Lewis, K.. "An introduction to mechanical engineering" 3rd edition. Cengage Learning.2013, pp.325-345

6. El-Hofy, H. "Fundamentals of machining processes. Conventional and nonconventional processes" 2nd edition. Boca Raton, London, New York: CRC Press/ Taylor and Francis group. 2013. pp.221-305
7. Fitzpatrick, M. "Machining and CNC technology" 3rd edition. The McGraw McGraw-Hill Companies, Inc.2014., pp.210-244
8. Yang, G. "Advances in future manufacturing engineering". Hong Kong, Kowloon: International Materials Science Society, Hong Kong.2014. pp.245-335
9. Nee, Andrew Y.C. Editor. "Handbook of manufacturing engineering and technology". London: Springer Reference. 2015 pp.410-445
10. Benkirane, Y., Kamoun, H., and Kremer, D. "Investigation on Ultrasonic Abrasive Material Removal Mechanisms—Analytical and Experimental Study," Int. Symp. for Electro Machining XI, Lausanne, Switzerland, pp. 891–900. 1995.
11. Cruz, C., Kozak, J., and Rajurkar, K. P. "Study of Rotary Ultrasonic Machining of Cryogenically Treated Ceramics," Int. Symp. for Electro Machining XI, Lausanne, Switzerland, 1995. pp. 911–920.
12. Egashira, K., and Masuzawa, T. "Micro Ultrasonic Machining by the Application of Workpiece Vibration," Annals of CIRP, 48(1). 1999. pp.131–134.
13. El-Hofy, H. "Surface Generation in Non-conventional Machining," MDP-6 Conf., Cairo, 1996. pp. 203–213.

Түйін

Мақалада гидрокесу технологиясы мен жабдықтары және металды гидроабразивті өңдеу қарастырылады. Металдарды және басқа да материалдарды гидрокесу қондырғыларының кинематикалық сұлбасы көрсетілген. Гидрокесуге арналған станоктарының әлемдік нарықта кеңінен таралған, танымал бренд модельдері келтірілген. Зерттеу нәтижесі бойынша әр түрлі материалдарға арналған кесілетін металдың қалыңдығына кесу жылдамдығының тәуелділіктері келтірілді, материалдың дәл кесуін қамтамасыз ететін минимал жылу бөлгіштігі, материалды плазмалық өңдеумен салыстырғандағы экономикалық тиімділігі, қалыңдығы үлкен материалдарды кесу мүмкіндігі анықталды.

Summary

The article considers the technology and equipment of waterjet and abrasive waterjet machining. Kinematic scheme of waterjet machining devices of metal and other materials is listed in the article. Machine models for waterjet cutting of the most famous brands were considered. According to the research: the dependence of cutting speed to metal thickness for various materials; minimal heat generation, which enables precise cut material, efficiency in comparison with plasma treatment of materials, ability of cutting thick materials were explored.