

УДК 621.923.01

Модернизация технологического оборудования для гидроабразивной резки

В.А. СКРЯБИН, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, 440026, РФ

E-mail: vs_51@list.ru

DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-8-13-18

Поступила в редакцию 29.12.2022

После доработки 21.02.2023

Принята к публикации 18.04.2023

В статье рассмотрены вопросы модернизации технологического оборудования для гидроабразивной резки. Приведены различные аспекты модернизации и оптимальные режимные параметры. Определены требования к типоразмерам деталей, подвергаемых гидроабразивной резке.

Ключевые слова: модернизация, технологическое оборудование, гидроабразивная резка, режимные параметры.

Modernization problems of technological equipment for waterjet cutting are considered. Various aspects of the modernization and optimal operating parameters are given. The requirements for the standard sizes of parts subjected to waterjet cutting have been determined.

Keywords: modernization, technological equipment, waterjet cutting, operating parameter.

Введение

Сложность продукции машиностроительного производства за последние три десятилетия в среднем выросли в шесть раз. Из общего числа типоразмеров деталей производства наибольшая доля (более 2/3 общей номенклатуры изделий) приходится на плоские детали сложной конфигурации. Плоские детали сложного контура имеют значительное распространение (более 50% номенклатуры), а их обработка составляет 20–30% от общей стоимости механообработки. При месячной программе, измеряемой десятками и сотнями штук сложноконтурных плоских деталей, использование традиционных методов обработки становится экологически нецелесообразным. Выход из создавшегося положения заключается в использовании деталей из толстолистового проката, а для его обработки — резки гидроабразивной струей [1].

Материалы и методы

Процесс гидроабразивной резки иллюстрирует рис. 1. От насоса сверхвысокого давления вода поступает в подводящий водовод 1 и фокусируется в отверстии сопла 2. Одновременно через подвод 3 в смесительную трубку 4 поступает абразивный поро-

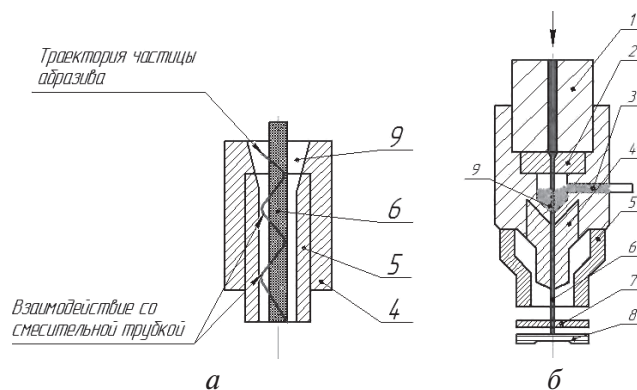


Рис. 1. Схемы режущей головки (б) и траектории движения частиц в смесительной трубке (а):

1 — подводящий водовод; 2 — сопло; 3 — подвод абразива; 4 — смесительная трубка; 5 — кожух; 6 — режущая струя; 7 — разрезаемый материал; 8 — гасящий слой воды; 9 — смесительная камера

Рекомендуемые значения параметров режима резания различных материалов

Условия обработки	Максимальная скорость резки, м/мин				
	Давление 414 МПа			Давление 276 МПа	
Соотношение диаметров входного и выходного сопел, мм	0,254/0,762	0,355/1,016	0,457/1,50	0,254/0,762	0,33/0,16
Расход воды, л/мин	2,27	4,36	7,27	1,91	3,23
Расход абразива, кг/мин	0,4	0,63	1,13	0,27	0,45
Мощность, кВт	25	50	80	11	25
Толщина, мм	Алюминий				
6,25	1,36	1,93	2,56	0,68	1,01
12,5	0,64	0,91	1,21	0,32	0,48
25	0,29	0,41	0,54	0,14	0,21
	Графит				
6,25	3,69	5,24	6,95	1,86	2,73
	Термореактивный пластик				
12,5	1,75	2,48	3,29	0,83	1,29
25	0,78	1,10	1,46	0,39	0,57
	Никелевый сплав				
6,25	0,46	0,65	0,86	0,23	0,34
12,5	0,22	0,31	0,41	0,11	0,16
25	0,01	0,14	0,18	0,05	0,07
	Стекло				
6,25	2,61	3,70	4,91	1,32	1,93
12,5	1,24	1,76	2,33	0,62	0,91
25	0,55	0,78	1,03	0,28	0,41
	Сталь среднеуглеродистая				
6,25	0,54	0,77	1,02	0,27	0,40
12,5	0,26	0,36	0,48	0,13	0,19
25	0,11	0,16	0,21	0,06	0,08
	Сталь нержавеющая				
6,25	0,50	0,71	0,95	0,25	0,37
12,5	0,24	0,34	0,45	0,12	0,18
25	0,10	0,14	0,20	0,05	0,08
	Титановый сплав (6Al4V)				
6,25	0,66	0,93	1,23	0,33	0,49
12,5	0,31	0,44	0,58	0,16	0,23
25	0,14	0,20	0,26	0,07	0,10

шок. Происходит смешивание струи воды, порошка и воздуха. Гидроабразивная струя направляется на поверхность обрабатываемого материала. В зоне резания образуется щель или сквозной паз. На выходе из паза разрушающая сила струи гасится водой, содержащейся в ванне 8.

Основными технологическими параметрами процесса гидроабразивной резки являются скорость перемещения режущей головки (см. рис. 1), скорость и давление гидроабразивной струи, толщина обрабатываемого материала, концентрация и размеры абразивных частиц, свойства разрезаемого материала. При завышенной скорости перемещения режущей головки происходит отклонение от прямолинейности водно-абразивной струи, заметно проявляется ослабление струи и, как следствие, возникновение конусности реза [2, 3].

При выборе параметров режима резания задаются следующие исходные данные:

- материал обрабатываемого изделия;
- толщина реза;
- состав и количество (расход) абразивного материала;
- диаметры водяного и рабочего сопел;
- давление воды на входе в рабочую головку;
- требуемые показатели качества поверхностного слоя.

Назначаемой величиной является подача головки, которую часто называют скоростью резания. В таблице приведены рекомендуемые скорости резания некоторых материалов.

По мере увеличения давления в струе, с одной стороны, происходит увеличение глубины резания, с другой стороны, ускоряется износ элементов режущей головки.

Для каждого вида и толщины обрабатываемого материала подбираются оптимальные значения давления и концентрации абразива и размера частиц.

Максимальное рабочее давление обычно составляет 300—320, 380, 415 или 600 МПа.

Оптимальная концентрация абразива зависит от вида материала, а также степени износа сопла.

При малой концентрации абразива эффективность гидроабразивной резки будет невысокой, а повышенная концентрация вызывает скопление абразива, которое вызывает затруднение его удаления из зоны резания. При этом понижается эффективность обработки.

Размер абразивных частиц должен составлять 10—30% диаметра режущей струи для обеспечения ее эффективного воздействия и стабильного истечения. Обычно размер частиц составляет 150—250 мкм, а в ряде случаев 75—100 мкм, если допустимо получение поверхности реза с низкой шероховатостью.

Модернизированное технологическое оборудование [4, 5], в отличие от базового, выполнено по модульному принципу. Модули соединяются между собой гибкими связями. Это позволяет легко осуществлять монтаж и демонтаж отдельных модулей на подвижные платформы, в том числе и на автомобильные, осуществлять транспортировку к объектам обработки. Мобильность установок способствует увеличению их загрузки.

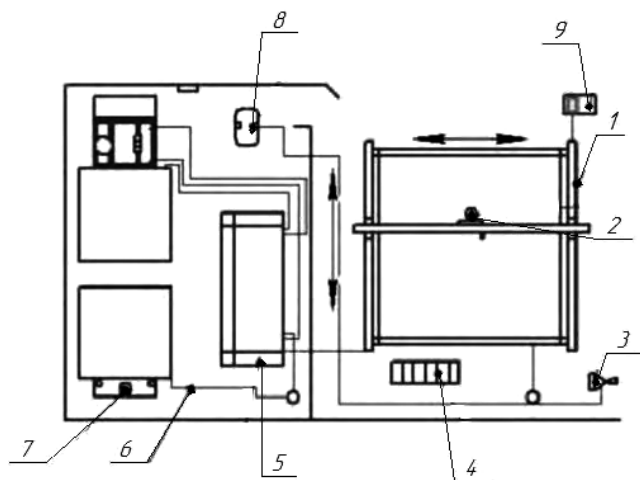


Рис. 2. Схема установки гидроабразивной резки:
1 — координатный стол; 2 — режущая головка; 3 — система подачи абразива; 4 — бак-отстойник; 5 — станция высокого давления; 6 — высоконапорная установка; 7 — система водоподготовки; 8 — воздушный компрессор; 9 — система управления

Модулями являются: координатный стол 1; режущая головка 2; система подачи абразива 3; бак-отстойник 4; станция высокого давления 5; высоконапорная разводка 6; система водоподготовки 7; воздушный компрессор 8; система управления 9 (рис. 2). Дополнительно в состав установки могут входить устройства для предотвращения столкновений режущей головки с заготовкой, механическая система предварительного просверливания, ловушка струи воды, гасящая ее энергию и служащая для сбора отработанного абразива. Таким образом, установки обладают разной степенью универсальности и автоматизации. Они могут быть выполнены в виде роботизированных комплексов.

Координатный стол 1 предназначен для размещения обрабатываемого изделия и позиционирования режущей головки. Стол включает портал 2 (рис. 3), перемещающийся по осям X , Y . Вдоль портала по оси Y движется поперечная тележка 3, обеспечивающая подъем и опускание по оси Z вертикальной каретки 4. Режущая головка 5 имеет возможность вращения b и c вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

Перемещение по каждой из осей осуществляется отдельным приводом. Положение головки определяется преобразователями координат или магнитной линейной системой.

Перемещение по осям ограничивается с помощью концевых датчиков. Опорные

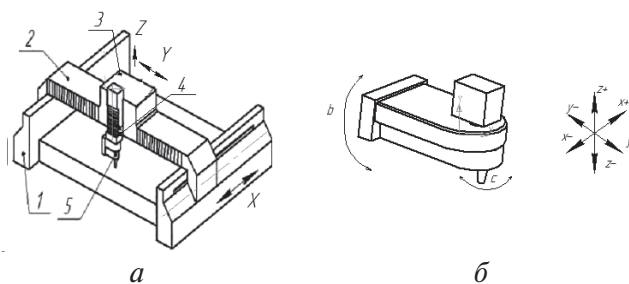


Рис. 3. Схема стола portalного типа (а) и направления вращения режущей головки b , c (б):

1 — продольные направляющие; 2 — портал; 3, 4 — соответственно поперечная и высотная каретки; 5 — режущая головка

датчики гарантируют повторяемость перемещений на требуемую позицию даже при сбоях в системе электропитания.

Программное управление обеспечивает динамический наклон головки, что позволяет избежать конусности обрабатываемых поверхностей.

Под рабочей поверхностью стола находится уловитель остаточной энергии (ловушка струи). Как дополнительный вариант, возможна установка оборудования для автоматической регулировки уровня воды, барботирования и откачки пульпы (шлама и использованных абразивных материалов) во внешний отстойный резервуар.

Режущая головка осуществляет окончательное формирование высоконапорной тонкой струи как режущего инструмента со своими геометрическими и энергетическими параметрами. Конструктивные особенности струйной головки следующие: взаиморасположение деталей, характер их соединения, контакт формируемой струи определяют качество и надежность головки. Существует множество конструкций струйных головок. Наиболее совершенными из них считаются конструкции со свободным вводом абразива в рабочую зону с минимальным нарушением их гидродинамических характеристик (рис. 4).

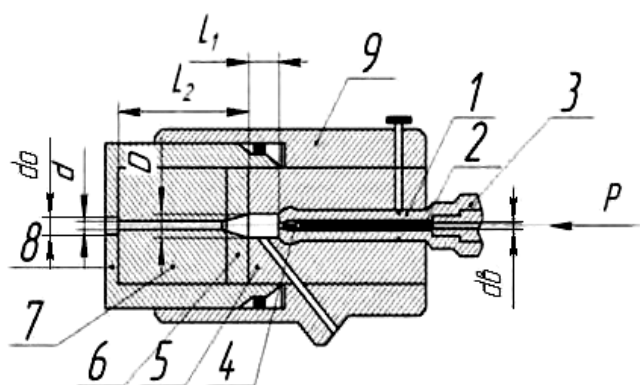


Рис. 4. Схема конструкции гидроабразивной головки:
1 — струеформирующее устройство; 2 — успокоитель; 3 — подводящий водовод; 4 — сопло; 5 — камера смешивания; 6 — переходник; 7 — коллиматор; 8 — корпус коллиматора; 9 — корпус головки

Основными геометрическими параметрами проточной части гидроабразивной головки являются: d_0 — выходной диаметр струеформирующего сопла; d_b — диаметр отверстия водовода; d — диаметр отверстия коллиматора; D — диаметр камеры смешивания; l_1 — длина камеры смешивания; l_2 — длина коллиматора.

Существующие теоретические модели формирования абразивной струи базируются на представлении, что формирование гидроабразивной струи происходит только в коллиматоре головки. При этом с помощью уравнений гидродинамики описывается разгон смеси воздуха и абразивных частиц как течение двух параллельных осесимметричных потоков воздушной струи и смеси воздуха с абразивными частицами. В соответствии с математической моделью формирования гидроабразивной струи параметры режущей головки подразделяются на три группы.

К первой группе относятся динамические и структурные характеристики струи высокого давления, влияющие на эффективность формирования гидроабразивной струи: диаметр сопла d_0 и давление воды перед насадкой.

Вторая группа включает геометрические параметры проточной части гидроабразивного инструмента: диаметр D , длина L камеры смешивания и геометрические параметры коллиматора: диаметр d и длина L_2 .

К третьей группе относятся параметры системы дозирования подачи абразива в камеру смешивания в условиях гравитационной подачи абразива в камеру смешивания или путем самовсасывания за счет разрежения.

Повышением эффективности существующих режущих головок является их модернизация путем охлаждения режущей струи распылением жидкого азота в камере смешивания (криогенная резка). В результате происходит охлаждение высоконапорной струи жидкости с испаряющимся азотом,

образование в ней частиц льда, выполняющих роль абразивных зерен, и возникновение на поверхности сопла ледяной корки, защищающей сопло от интенсивного износа. Гидроабразивная головка с охлаждением представлена на рис. 5.

Головка функционирует следующим образом. По трубопроводу 4 через форсунку, расположенную в патрубке 3, внутрь камеры 5 подается вода и распыляется жидкий азот. Происходит интенсивное охлаждение корпуса режущей головки 1 и циркулирующей воды. Эффективность охлаждения повышается за счет оребрения 14.

Одновременно по трубопроводу 7 через форсунку, расположенную в патрубке 6, внутрь камеры смешивания 9 также поступает распыленный жидкий азот. В результате происходит непосредственное охлаждение высоконапорной струи жидкости испаряющимся азотом и образование в ней частиц льда, а также происходит кристаллизация водяной пыли, образующейся в камере 9. Выход газа из камер предварительного и окончательного охлаждения осуществляется через патрубки 11, 13.

Криогенная резка позволяет разрезать сверхтолстые и прочные материалы, недоступные другим видам резки. Криогенная резка является конкурентом для других высокотехнологичных видов резки: лазерной, плазменной, гидроабразивной.

Достоинствами криогенной резки являются возможность резки всех видов материалов, высокая скорость реза, практически полное отсутствие ограничений на толщину разрезаемого материала, высокое качество реза толстого материала, относительная безопасность процесса.

Станция высокого давления включает насосы прямого действия или мультипликаторного. Насосы прямого действия основаны на создании давления жидкости кривошипно-шатунными механизмами, приводимыми в действие электрическими двигателями. Насосы прямого действия мо-

гут надежно и стабильно работать на уровне давления до 400 МПа. Практика использования установок для гидроабразивной резки показала, что процесс резки устойчиво и стабильно осуществляется в диапазоне давления 270—340 МПа. Кроме того, насосы прямого действия обладают высоким КПД — до 95%.

Насосы мультипликаторного действия способны создавать давление 400—600 МПа.

Давление в таких насосах поднимается ступенчато. На первой ступени первичное давление создается гидравлическим насосом. При этом используют гидравлическую жидкость, которая последовательно посту-

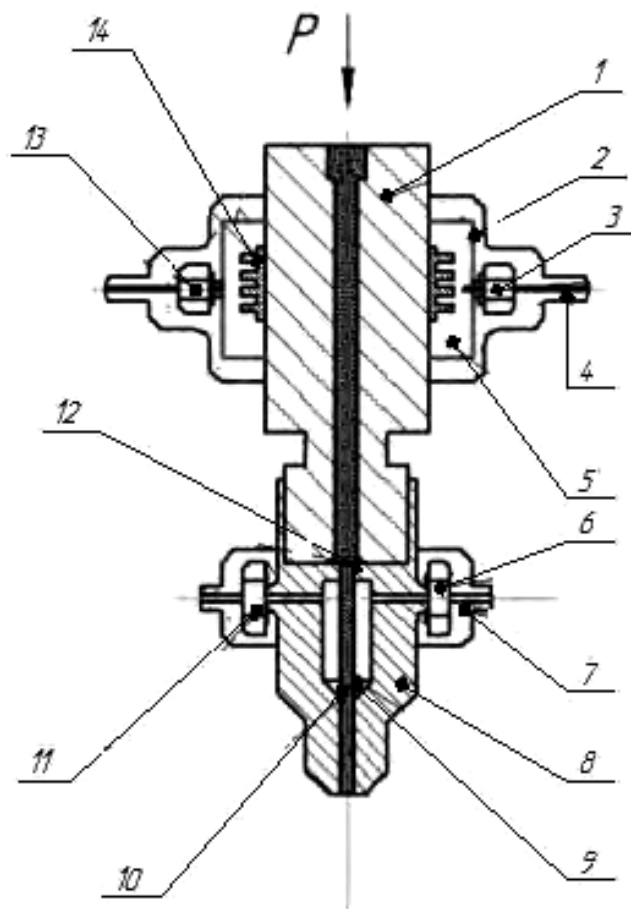


Рис. 5. Гидроабразивная головка с охлаждением:

1 — корпус режущей головки; 2, 8 — корпуса устройств соответственно предварительного и окончательного охлаждения; 3, 6 — входные патрубки; 4, 7 — входные трубопроводы; 5 — камера предварительного охлаждения; 9 — смешивательная камера; 10 — струя высокого давления; 11, 13 — выходные патрубки; 12 — сопло; 14 — оребрение

пает в левый и правый цилиндры мультипликатора.

Площади цилиндров мультипликатора могут быть в 20 раз больше площади плунжеров мультипликатора. В результате давление воды, выталкиваемой плунжерами из каждого цилиндра, в 20 раз выше первичного давления в гидравлическом насосе. Вода высокого давления последовательно из каждого цилиндра поступает в аттенуатор (аккумулятор), который сглаживает пульсации давления и обеспечивает ее непрерывный поток в режущую головку.

Разводку высокого давления используют для подачи воды от насоса высокого давления к режущей головке системой неподвижных и подвижных труб. Для обеспечения плотности соединений при движении портала и рабочей головки используют специальные шарниры высокого давления или спиральные специальные конструкции.

Обсуждение результатов

Область применения оборудования для гидроабразивной резки весьма обширна: обработка деталей из высококачественных сталей, цветных металлов и сплавов, стекла, натурального камня, керамики, материалов для авиационной и космической промышленности, пластмассы, композиционных материалов и т.д. Гидроабразивной резкой можно разрезать практически все материалы. При этом не возникает механических деформаций, поскольку воздействие струи

составляет 1—100 Н, а температура в зоне реза не превышает 60—90 °С. Поэтому в материале отсутствуют термические напряжения. Исключается оплавление или пригорание кромок. Возможна обработка термочувствительных материалов. Обеспечивается экологическая чистота процесса, полное отсутствие вредных газовых выделений. Модернизированное оборудование гидроабразивной струей способно разрезать материалы толщиной до 300 мм по сложному контуру с высокой точностью. Возможна резка со скосом кромок. При резке возможны минимальные зазоры между деталями, что позволяет минимизировать расход обрабатываемого материала. Режущая головка обеспечивает перемещение абразивной струи в любом направлении. Поэтому возможно получение двумерных плоских и трехмерных объемных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сканави Н.А., Довыденко Т.А. Отходы гидроабразивной резки металлов как перспективный компонент сырьевых строительных смесей // Научное обозрение. 2017. № 19. С. 28—31.
2. Skanavi, N., Dovydenko, T. Assessment of possibility of metal waterjet cutting wastes use in building materials production // RSP 2017 — XXVI R-S-P Seminar 2017 Theoretical Foundation of Civil Engineering. 2017. P. 000417
3. Боженков П.И. Комплексное использование минерального сырья и экология. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов. 1994. 265 с.
4. Землянушнов Д.Ю., Орешкин Д.В., Сканави Н.А. Методика экологической оценки применения отходов мрамора в производстве строительной керамики // Научное обозрение. 2014. № 7. С. 661—664.
5. Минералы. Диаграммы фазовых равновесий. В. 1 / Под ред. Ф.В. Чухрова, И.А. Островского, В.В. Лапина М.: Изд-во «Наука». 1974. С. 139—142.