ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ

ЛУГОВОЙ И. В.

Белорусский национальный технический университет

Отверстия относятся к замкнутым поверхностям, получаемым в материалах различными способами, которые можно классифицировать по ряду факторов: по виду обрабатываемого материала, форме отверстия в продольном и поперечном сечениях, точности размеров (рис. 1). Они могут быть сквозными или глухими.

Отдельную группу в деталях машин и приборов занимают отверстия, которые необходимо получить с высокой точностью формы и размерами с глубиной до 10 мм и диаметром до 1 мм [1]. Другую группу составляют отверстия, получаемые в труднообрабатываемых материалах. К ним относятся отверстия, получаемые традиционными способами в материалах с высокой твердостью и в хрупких материалах: вольфрамсодержащие и титанокарбидные сплавы, алмаз, рубин, лейкосапфир, закаленные стали, магнитные сплавы из редкоземельных элементов, термокорунд и другие, а также германий, кремний, ферриты, керамика, стекло, кварц, полудрагоценные и поделочные минералы и материалы, в которых могут образовываться сколы и микротрещины при обработке. Среди них особую группу составляют отверстия с криволинейным профилем в продольном направлении, некруглые в поперечном сечении, а также отверстия и каналы в биологических материалах (кости и ткани), обработка которых представляет большую трудность.

Существуют различные методы обработки отверстий в материалах, каждый из которых обладает определенными достоинствами, недостатками и ограничениями по применению (рис. 2).

Рис. 1. Классификация обрабатываемых отверстий

Рис. 2. Методы обработки отверстий

Наибольшее применение среди них нашла обработка отверстий резанием лезвийным инструментом в металлических материалах. При механической обработке малых отверстий основным режущим инструментом являются дефицитные и дорогостоящие сверла, которым необходимо придавать большую скорость вращения. Однако данный метод не позволяет получать криволинейные отверстия, затруднена обработка отверстий со сложным профилем в хрупких материалах. Обработка абразивным инструментом – более приемлемый способ

получения отверстий с высокой точностью, а также отверстий в хрупких материалах. Абразивная обработка может осуществляться как со связанным, так и со свободным абразивом. При обработке связанным инструментом – шлифовании, суперфинишировании, хонинговании – абразивные зерна закреплены в рабочем инструменте. Обработка со свободным абразивом относится к финишным методам. К ней относятся также доводка, притирка и полирование.

Для повышения производительности и эффективности обработки отверстий в настоящее время широкое распространение получают комбинированные методы, когда к традиционным способам дополнительно подводят новые источники энергии [2, 3]. К этим методам относится, в частности, электрохимическая обработка материалов, которая основана на механизме съема (растворения, удаления металла) в процессе электролиза, причем количество снятого металла пропорционально силе тока и времени обработки [4, 5]. Заготовку при этом методе присоединяют к положительному полюсу источника питания (анод), а инструмент – к отрицательному (катод). На установках для электрохимической обработки отверстий электролит прокачивается через полость электрода-инструмента и отводится на слив через зазор между электродом и стенкой обрабатываемого отверстия. При получении сквозных отверстий стабильность электрохимического процесса нарушается в момент выхода электрода-инструмента из сквозного отверстия.

Электрофизические методы включают в себя лазерную, электроэрозионную и ультразвуковую обработку. Каждый из методов обладает определенными технологическими возможностями и применяется в тех случаях, когда обработка другими способами затруднена. Так, лазерную обработку используют при необходимости обработки отверстий в особо твердых материалах – рубине, алмазе, твердосплавных материалах и пр. Преимущества лазерных источников при сверлении отверстий в материалах: возможность бесконтактной обработки с небольшой зоной прогрева; возможность фокусировки в пятно малых размеров.

Электроэрозионные методы целесообразны при обработке отверстий с фасонным профилем в продольном и поперечном сечении в особо твердых материалах [6–8]. Однако применение данного метода ограничено использованием электропроводящих материалов. Поэтому он не может быть использован при обработке неметаллических материалов. К недостаткам данного метода также можно отнести сравнительно небольшую глубину обработки отверстий.

В настоящее время самым эффективным методом повышения производительности процессов при одновременном улучшении качества обработки отверстий является введение в зону обработки ультразвуковых колебаний. Данный метод является наиболее распространенным видом размерной обработки. На ультразвуковых станках обрабатывают отверстия различных формы и длины. При этом вынужденные колебания вводят в зону резания через колеблющийся инструмент: лезвийный или абразивный. Абразивную обработку отверстий можно осуществлять инструментом как со связанным, так и со свободным абразивом. В последнем случае инструмент, совершающий ультразвуковые колебания, воздействует на поверхность изделия через абразивную суспензию. Такая обработка базируется на двух основных процессах: ударном внедрении абразивных зерен, вызывающих выкалывание частиц обрабатываемого материала и циркуляции, и смене абразива в рабочей зоне. Обязательным условием высокопроизводительной ультразвуковой обработки материалов является интенсивное протекание этих двух процессов. Зерна абразива под действием ударов колеблющегося инструмента ударяют по поверхности обрабатываемого изделия и проводят его разрушение. В качестве абразива обычно используется карбид бора или карбид кремния, в качестве транспортируемой жидкости – обычная вода. Вследствие воздействия частичек абразива на поверхности рабочего инструмента происходит его разрушение. Для уменьшения износа рабочего инструмента его обычно выполняют из вязких материалов, не разрушающихся под действием ударных нагрузок. В результате высокочастотных ударов торца рабочего инструмента по абразивным зернам возникают сколы частиц обрабатываемого материала. В общем случае механизм ультразву-

ковой обработки можно представить как многоэтапный процесс, состоящий из образования микротрещин и выколов при ударе инструмента по частицам абразива, перемещения выколотых частиц обрабатываемого материала и разрушения абразивных частиц под действием ультразвуковых колебаний, подачи и удаления отработанного абразива и снятого материала. Производительность процесса V примерно пропорциональна квадрату критерия хрупкости t

$$V = f(Ct^2),$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Эффективность ультразвуковой обработки отверстий снижается от действия ряда технологических факторов. К их числу относятся: глубина внедрения инструмента в материал, циркуляция абразивных зерен в зоне резания и их размеры. С этой целью в зону обработки необходимо непрерывно подавать абразивную суспензию, несущую зерна свежего абразива и удаляющую частицы снятого материала и размельченный абразив. Для улучшения попадания частиц в зону резания используют различные приемы и методы. Так, в [9, 10] предложено использовать нагнетание абразивной суспензии в зону обработки через инструмент. Другим эффективным способом улучшения процесса циркуляции и смены абразива в рабочей зоне является использование вакуумного насоса. Однако применение вакуумного отсоса затруднительно при обработке глухих отверстий. Особенное значение это имеет при получении сквозных отверстий в хрупких материалах, где могут образовываться сколы при выходе инструмента из обрабатываемого отверстия. Для
предотвращения образования сколов в материале используют различные методы, в частности практикуется приклеивание заготовки на стеклянную подкладку и т. д. Данным методом можно обрабатывать отверстия одноместными инструментами, когда необходимо получить одно или несколько отверстий, и групповыми инструментами, когда одновременно можно обрабатывать несколько деталей или их элементов [11]. Кроме того, был выявлен основной недостаток ультразвукового способа обработки, который заключается в существенном снижении производительности процесса обработки по мере увеличения глубины отверстия. Для объяснения этого явления используются два предположения. Согласно первому при увеличении боковой поверхности рабочего инструмента, контактирующей с обрабатываемым материалом, амплитуда колебаний инструмента уменьшается вследствие трения, что приводит к снижению производительности. Второе предположение, основанное на результатах многочисленных экспериментов, объясняет уменьшение скорости обработки с увеличением глубины, ухудшением условий подачи свежего абразива в зону обработки и удаления продуктов обработки [12].

Механизм ультразвукового взаимодействия контактируемых тел в условиях абразивной среды заключается в изменении кинематики, что сопровождается значительным уменьшением высоты микронеровностей [13]. При этом снижается температура обрабатываемого материала по сравнению с обычным шлифованием, а также уменьшаются наросты и налипы на рабочей поверхности инструмента. Известные до настоящего времени способы ультразвуковой обработки отверстий осуществляют, как правило, инструментом с высокой жесткостью в продольном и поперечном направлениях. Такие ультразвуковые системы обеспечивают высокую добротность, передачу на инструмент акустической мощности при малых потерях энергии. Однако производительность работы таких систем ограничена амплитудой колебаний инструмента, увеличение которой ограничено прочностными характеристиками инструмента.

С целью повышения производительности и качества обработки отверстий малого диаметра используют различные методы, например при сверлении отверстий жестким инструментом на него накладывают частотно-модулированные колебания [14]. В некоторых устройствах частотно-модулированные колебания накладывают на СОЖ, а для повышения производительности обработки и стойкости инструмента волновод выполнен с возможностью обеспечения направления наложения колебаний перпендикулярно главной режущей кромке сверла [15].

Опыт использования ультразвука на операциях обработки глубоких отверстий показал, что наибольший эффект можно достичь повышением амплитуды колебаний торца рабочего инструмента, сохранив при этом его прочностные свойства. Для этой цели в настоящее время широкое распространение получили методы модулированных колебаний. Модуляцию осуществляют либо электрическими параметрами ультразвукового генератора, либо введением дополнительных источников вибрации инструмента.

В [16] предложен метод повышения частоты колебания рабочего инструмента путем модуляции подаваемого высокочастотного электрического сигнала на преобразователь. В [17] повышение амплитуды колебаний для ультразвукового полирования осуществляется введением промежуточного упругого элемента в виде спирали с углом подъема винтовой линии 50–80°. Спираль выполняет функцию накопителя энергии и преобразователя продольных колебаний в более сложные, комбинированные.

Для обеспечения возможности обработки криволинейных каналов и отверстий, получения фасонных профилей отверстий в хрупких материалах в настоящее время в ультразвуковых системах используются специальные упругие элементы в качестве передающих звеньев акустической системы или инструментов [18].

Для обработки труднодоступных поверхностей, в том числе и внутренних поверхностей и каналов, в [19, 20] предложено устройство, в котором используется упругий инструмент в виде ленты (или проволоки). Рабочий наконечник инструмента, выполненный в виде петли из этих упругих материалов, закрепленных на волноводе, позволяет обрабатывать кромки пазов и отверстий. С целью расширения диапазона частот колебаний инструмента в устройстве [21, 22] для ультразвуковой обработки материалов предложено использовать набор шаров, закрепленных в пружинящей направляющей, которая служит накопителем энергии. Устройство позволяет изменять диапазон частот колебаний за счет размеров и массы шаров.

В [23] показана возможность использования в качестве акустических систем тонких гибких концентраторов-волноводов для передачи высокочастотных колебаний на рабочий инструмент. В волноводе – три участка, имеющих различные диаметры и сопряженных между собой плавными переходами по типу концентраторов Фурье. Колебания гибких волноводов имеют сложный характер и могут рассматриваться как связанные изгибно-продольные колебания. Практика применения таких акустических систем в медицине показала возможность получать амплитуды колебаний рабочего инструмента до 100 мкм и разрушать кальцинированные образования на большом расстоянии. Очевидно, такие акустические системы можно применять для обработки глубоких криволинейных отверстий, однако опыт использования подобных акустических систем весьма ограничен как в теоретическом, так и в практическом аспекте.

ВЫВОД

Таким образом, проведенный обзор литературных данных показал, что наиболее перспективным методом повышения производительности обработки отверстий малого диаметра является использование ультразвуковых систем с модулированными колебаниями, упругими промежуточными элементами, а также с гибкими длинными концентраторами-волноводами. Эти вопросы требуют проведения теоретических и экспериментальных исследований с целью оптимизации и разработки новых ультразвуковых систем для эффективной обработки отверстий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ящерицын, П. И.** Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Барботько. – Минск: Наука и техника, 1976. – С. 328.

2. **Справочник** по электрохимическим и электрофизическим методам обработки; под общ. ред. В. А. Волосатова / Г. Л. Амитан [и др.] / Л.: Машиностроение, 1988. – 719 с.

3. **Способ** ультразвуковой размерной обработки отверстий: а. с. 1291315 СССР / Б. П. Крамаренко, М. А. Бурнашева // Бюл. изобр. – 1987. – № 7. – С. 2.

4. **Гайдученко, Э. И.** Электроэрозионная обработка отверстий малых диаметров / Э. И. Гайдученко. – Л.: Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1967. – С. 3–4.

5. **Киселев, М. Г.** Размерная электрохимическая обработка материалов / М. Г. Киселев, С. Н. Бондаренко, А. В. Дроздов. – Минск: БНТУ, 2005. – С. 164.

6. **Черепанов, Ю. П.** Электрохимическая обработка в машиностроении / Ю. П. Черепанов, Б. И. Самецкий. – М.: Машиностроение, 1972. – С. 36–37.

7. **Бирюков, Б. Н.** Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б. Н. Бирюков. – М.: Машиностроение, 1981. – С. 28–29.

8. **Способ** доводки отверстий: а. с. 1189577 СССР / В. П. Луговой // Бюл. изобр. – 1985. –№ 41. – С. 3.

9. **Ангелов, Г. С.** Применение ультразвука в промышленности; под ред. А. И. Маркова / Г. С. Ангелов, И. Н. Ермолов, А. М. Мицкевич. – М.: Машиностроение, 1975. – С. 240.

10. **Марков, А. И.** Ультразвуковая обработка материалов / А. И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 21–28.

11. **Волосатов, В. А.** Ультразвуковая обработка / В. А. Волосатов. – Л.: Лениздат, 1973. – С. 181–207.

12. **Марков, А. И.** Ультразвуковая доводка отверстий алмазным инструментом // Прогрессивные технологические процессы и оборудование ЭФХК обработки / А. И. Марков, Н. В. Бекренев. – М.: Общественное знание, 1989. – С. 88–93.

13. **Киселев, М. Г.** Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, В. А. Ибрагимов. – Минск: Тесей, 2001. – С. 8–12.

14. **Устройство** для подачи смазочно-охлаждающих жидкостей при обработке отверстий малого диаметра: а. с. 2281847 РФ / Е. С. Киселев, М. В. Табеев // Бюл. изобр. – 2002. – № 23. – С. 6.

15. **Устройство** для подачи смазочно-охлаждающих жидкостей при обработке отверстий малого диаметра: а. с. 2284878 РФ / Е. С. Киселев, В. Н. Ковальногов, М. В. Табеев // Бюл. изобр. – 2005. – № 28. – С. 6.

16. **Томаль, В. С.** Оборудование обработки оптических и электронных модулей в жидких средах с частотной и фазовой модуляцией ультразвукового сигнала / В. С. Томаль. – Минск: БГУИР, 2008. – С. 23.

17. **Устройство** для ультразвукового полирования: а. с. 854685 СССР / В. Ф. Зимовец, П. М. Герасемчук, С. Н. Стручков, С. Д. Вуйцик // Бюл. изобр. – 1981. – № 30. – С. 2.

18. **Nicolai, Neumann** On the analysis jf s simple impact drill model using set-oriented numerical methods / Nicolai Neumann, Thomas Sattel, Jorn Wallaschek. – Heinz Nixdorf Institute, Furstenallee 11, 33102 Paderborn, Germany, 2005. – P. 119–120.

19. **Излучатель** изгибных колебаний: а. с. 657868 СССР / Ю. С. Андреев, В. Н. Бокановский // Бюл. изобр. – 1979. – № 15. – С. 2.

20. **Ультразвуковой** инструмент: а. с. 382439 СССР / А. А. Горбунов, В. М. Салтанов, В. Г. Моисеев, Н. В. Савенков, Е. П. Калинин // Бюл. изобр. – 1973. – № 23. – С. 2.

21. **Sherrit, S.** Modeling of the ultrasonic/Sonic driller/ Corer: USDC / S. Sherrit, X. Bao, Z. Chang // IEEE Ultrasonics symposium, San Juan, Puerto Rico, Oct. 2000. – P. 647–651.

22. **Устройство** для преобразования частоты акустических колебаний: а. с. 1315197 СССР / Г. О. Волик, Ю. А. Кудрин // Бюл. изобр. – 1987. – № 21. – С. 2.

23. **Киселев, М. Г.** Ультразвук в медицине / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, Д. А. Степаненко. – Минск: БНТУ, 2009. – С. 12–93.

Поступила 15.02.2011

УДК 355.2.199

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЗАВИСИМЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Канд. воен. наук БАРТОШЕВИЧ А. В., канд. воен. наук, доц. ТАМЕЛО В. Ф.

Белорусский национальный технический университет

Успех применения математических моделей зависит от их качества, но необходимо иметь и количественную оценку. Рассмотрим один из подходов к количественной оценке эффективности моделей, принимая во внимание, что любая модель есть субъективное отражение объективной действительности.