

Сергей Яковлевич Березин,
доктор технических наук, профессор,
Забайкальский государственный университет,
672039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30,
e-mail: berlog_berezin2011@mail.ru
Ирина Михайловна Кулеш,
доцент,
Забайкальский государственный университет,
672039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30,
e-mail: kulesh.irina22@yandex.ru

Новые возможности использования ультразвука в процессах внутреннего резьбовыдавливания

Рассмотрен опыт применения мощного фокусированного ультразвука для активации процессов внутреннего резьбообразования. Представлены конструкции технологической оснастки с фокусирующими узлами для установки на станках сверлильной группы.

Ключевые слова: ультразвук, метчик, раскатник, резьбонарезание, резьбообразование, фокусировка, акустическая линза, фокусная область, головка резьбонарезная.

Sergey Yakovlevich Berezin,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Transbaikal State University,
30 Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, Russia, 672039,
e-mail: berlog_berezin2011@mail.ru
Irina Mikhailovna Kulesh
Associate Professor,
Transbaikal State University,
30 Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, Russia, 672039,
e-mail: kulesh.irina22@yandex.ru

New New Areas Using of the Powerful Ultrasonic During Internal Tapping Screw

The experience of the application of high-power focused ultrasonic to activate the processes of internal threading is considered. The constructions of tooling with focusing units for installation on drilling machines are presented.

Keywords: ultrasonic, tap, forming tap, threading, tapping screw, focusing, acoustic lens, focal area, thread-cutting block.

Несмотря на достаточно полное исследование резьбонарезных процессов, интенсифицированных ультразвуком, в настоящее время интерес к данной проблеме не ослабевает. Как в России, так и за рубежом появляются новые работы по данной тематике. Исследуются возможности новых схем подведения ультразвуковой (УЗ) энергии к зоне обработки, возможности активации переходов ориентирования и наживления крепежных деталей, эффективность применения УЗ для труднообрабатываемых материалов, возможности использования

модулированного УЗ, разрабатываются новые виды и конфигурации волноводов и другие направления. Одним из перспективных методов активизации технологических процессов различного назначения является применение фокусированного ультразвука. Способы и теоретические основы фокусирования ультразвуковых волн исследовались Л. Д. Розенбергом, И. Н. Каневским и др. для использования в процессах абразивной обработки, очистки от масел и обезжиривания. Фокусирование ультразвука широко используется в медицинской технике, фармакологии и других областях [1; 2].

Эффективность фокусированного ультразвука определяется тем, что в зону его воздействия попадает большее количество акустической энергии, которая концентрируется линзой или другой системой. Таким образом, если в зоне обработки выполняется работа $A(H \cdot m)$ и при этом зона находится в области акустического фокуса, то эффективность можно оценить коэффициентом

$$K_1^\Phi = \frac{A}{I_\Phi}, \left[\frac{H \cdot m \cdot \text{см}^2}{\text{Вт}} \right] \quad (1)$$

где I_Φ – интенсивность УЗ в фокальной области. Если акустическая система не имеет фокусирующих устройств, то значительная доля энергии УЗ рассеивается, а в зону обработки попадает только незначительная её часть с интенсивностью I . Тогда коэффициент эффективности нефокусированного УЗ будет оценен по формуле

$$K_1 = \frac{A}{I}, \quad (2)$$

При этом будет справедливым условие $K_1 > K_1^\Phi$.

На кафедре автоматизации производственных процессов ЗабГУ разработаны конструкции ультразвуковой технологической оснастки с фокусирующими устройствами, позволяющими передавать концентрированную акустическую энергию через систему волноводов на метчик, или на деталь с отверстием. Волноводы выполнены из материалов с разной плотностью, что позволяет кроме фокусирования получать в зоне обработки сложную интерференционную картину УЗ колебаний, избегая попадания режущих кромок метчика в зону с нулевой пучностью [3].

На рис. 1 представлена конструкция ультразвуковой головки для нарезания резьбы метчиками или выдавливания раскатниками. Она имеет невращающийся корпус 1 с щётчным токоподводящим устройством 2 и опорами качения 3, на которых установлена приводная часть с хвостовиком 4, стаканом 5 и крышкой 6, на которой в свою очередь внутри стакана, закреплён пьезоэлектрический преобразователь 7 с частотопонижающей накладкой 8, а снаружи крышка 6 выполнена заодно со стержневым концентратором 9, вокруг основания которого, в крышке 6, изготовлено сферическое вогнутое углубление 10, для установки в него ответной части фокусирующего концентратора 11. Стержневой концентратор 9 имеет гнездо 12 для приводной части инструмента 13, а фокусирующий концентратор 11 заканчивается цангой 14 для зажима стержневой части инструмента.

На рис. 2 представлена схема фокусирующей области, D – фокусирующей области (линзы), d – диаметр резьбы, Z – осевая координата, R – геометрический радиус линзы, Θ_m – плоскостный угол раскрытия волнового фронта, Z_Φ – зона сфокусированной акустической энергии, f_n – акустическое фокусное расстояние, J_1 – интенсивность ультразвуковых колебаний пьезоэлектрического преобразователя, J_Φ – интенсивность ультразвуковых колебаний в зоне фокуса.

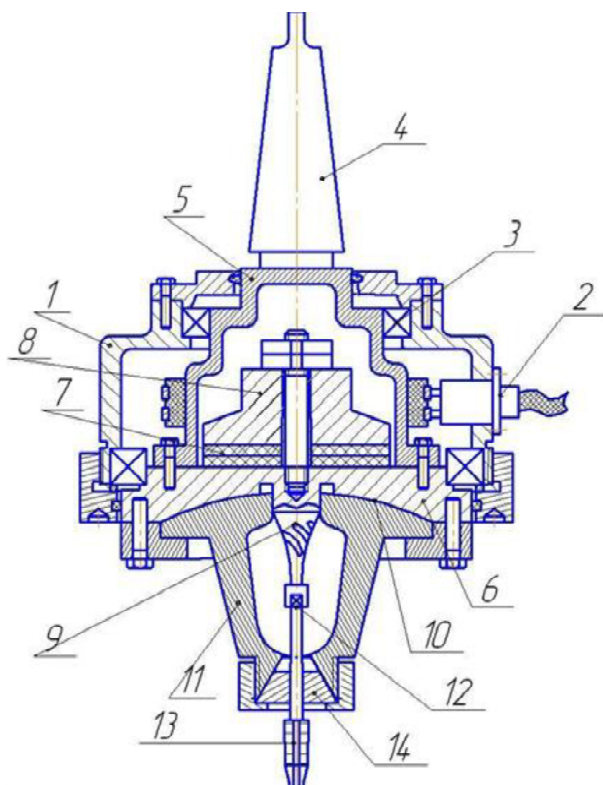


Рис. 1. Ультразвуковая головка с фокусирующей системой

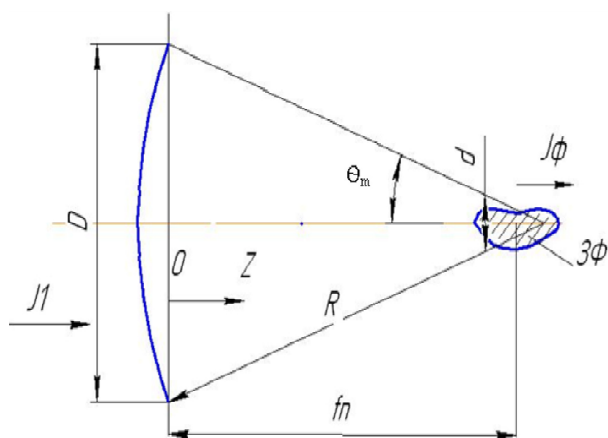


Рис. 2. Схема формирования фокусированного пучка акустической энергии

Согласно рис. 1 головка работает следующим образом: пьезоэлектрический преобразователь 7 совместно с частотопонижающим элементом 8 создают ультразвуковые колебания, передаваемые на крышку 9 и фокусирующий концентратор 11. В силу наличия винтовых пазов на образующей поверхности концентратора 9 создаются продольно-крутильные колебания, которые передаются через наконечник 12 инструменту 13. Они снижают силы фрикционного и деформационного характера, возникающие при резбообразовании. В тяжёлых условиях нарезания резьб (резьбы с крупным шагом, обработка вязких материалов, титановых сплавов и т. д.) энергии колебаний, передаваемых только через приводную часть может оказаться недостаточно для преодоления сил сопротивления и обеспечения стойкости инструмента. Это связано с потерями акустической энергии в контакте инструмента с обрабатываемой деталью за счёт поглощения и рассеивания. Чем глубже инструмент входит в отверстие, тем меньше интенсивность колебательной энергии ($\text{Вт}/\text{см}^2$), приходящейся на единицу площади режущей кромки.

Наличие фокусирующего концентратора 11 позволяет сконцентрировать большую часть энергии в зоне резбообразования и удержать её от рассеивания в объеме обрабатываемой детали. Сфокусированная акустическая энергия передаётся от линзы 10, крышки 6, концентратору 11 и цапге 14, надёжно удерживающей стержень инструмента 13.

Общий вид ультразвуковой головки для резбонарезных операций представлен на рис. 3. Она закрепляется на пиноли шпинделя, имеет выходной конус для крепления вспомогательного инструмента и токоподводящую систему связи с ультразвуковым генератором.

Применение фокусирующего концентратора ведёт к росту интенсивности звуковой волны по мере приближения к акустической фокусной зоне ЗФ (фиг. 2). Известно, что мощность звукового фронта W связана с интенсивностью ультразвука J следующим отношением [2]

$$J = \frac{W}{F_2}, \quad (3)$$

где F_2 – площадь сечения звукового фронта в сфокусированной области по координате Z , равная, в соответствии с рис. 2.



Рис. 3. Ультразвуковая резбонарезная головка с фокусирующей системой на станке 2Е53

$$F_2 = \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{R - z}{R} \right). \quad (4)$$

Таким образом, интенсивность в соответствии со значением F_2 будет равна

$$J = \frac{4WR}{\pi D^2 (R - z)} \quad (5)$$

Это означает, что по мере приближения фокусного расстояния к геометрическому радиусу R интенсивность будет возрастать.

В силу того, что акустический фокус определяется коэффициентом преломления волн на границе раздела материалов линзы, его положение отличается от геометрического фокуса системы. Например, значение крайнего акустического расстояния равно [2].

$$\frac{F_n}{R} = N(N^2 - 1) \pm 1, \quad (6)$$

где N – коэффициент преломления фокусирующей системы $N = k/k_0$,

k, k_0 – волновые числа материалов линзы (крышки и фокусирующего концентратора соответственно);

знак (+) при $N < 1$, (–) при $N > 1$.

Наличие фокусирующего концентратора позволяет получать более высокую, по сравнению с прототипом, концентрацию акустической энергии в небольшом объёме. Фокусирование ультразвука снижает рассеивание звуковой энергии и обеспечивает перенос максимума интенсивности колебаний в фокальную область, которая за счёт геометрии акустической линзы направляет сконцентрированную энергию ультразвука в зону резбообразования. Для передачи сфокусированной энергии полый концентратор снабжен цапгой, охватывающей стержневую часть инструмента, обеспечивая плотный акустический контакт.

Стержневой концентратор, имеющий винтовые пазы и гнездо для приводной части инструмента, обеспечивает передачу крутящего момента с наложенными на него крутильно-осевыми колебаниями с длиной волны, отличной от длины волны колебаний, передаваемых фокусирующим концентратором. Такая схема передачи акустической энергии приводит к появлению в зоне резбообразования сложной дифракционной картины колебаний от наложения друг на друга двух волн различной длины, но одинаковой частоты. Разные длины стоячих волн определяются различной плотностью материалов обоих концентраторов, а, соответственно и различной скоростью распространения в них ультразвуковых колебаний.

Наложение двух стоячих волн различной длины перекрывает узловые точки с нулевой амплитудой, что делает предлагаемую систему независимой от координат их расположения. В случае прототипа мы имеем дело с одной стоячей волной, причем с неустойчивым положением нулевых точек (узлов) в силу зависимости от напряженного состояния элементов звукопередающей системы.

В случае резбовываждения механизм действия ультразвука особенно актуален, т. к. его действие приводит к снижению силовой напряженности процесса, а следовательно и к повышению его надежности. Исследовать действие ультразвука на процесс пластического течения металла возможно путем измерения микротвердости, а также деформационной составляющей крутящего момента при завинчивании образцов, несущих только заходную часть, применением рентгеноструктурного и микроструктурного анализа [4].

Величина крутящего момента резбообразования может быть описана следующей степенной функцией

$$M_{кр} = C_{MT} \cdot \delta^x \cdot V^y \cdot \frac{d^z}{p} \cdot n, \quad (7)$$

где C_{MT} – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала, аппроксимируемый функцией следующего вида

$$C_{MT} = C_{бу} - \alpha \cdot A \cdot \sqrt{K_1} \left(\pi + \frac{\pi^3}{3} + \frac{\pi^5}{5} + \frac{\pi^7}{7} + \dots \right), \quad (8)$$

где $C_{бу}$ – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала в случае применения нефокусированного УЗ; α – коэффициент пропорциональности;

A – амплитуда УЗ;

K_I — коэффициент усиления по интенсивности УЗ в зоне фокуса, в соответствии с рис. 2, равный [1; 5];

$$K_1 = 4\pi^2 \frac{h^2}{\lambda^2} \cdot \cos^2 \frac{\theta_m}{2}, \quad (9)$$

h — глубина излучения;

λ — длина волны;

Θ_m — плоскостной угол раскбрытия волнового фронта и далее по формуле (3):

δ — припуск под резббу;

V — скорость резббонарезания;

d, P — диаметр и шаг резббы соответственно;

x, y, z — экспериментальные показатели степенной функции;

n — число ниток нарезаемой резббы.

В процессе исследования силовой напряженности процесса внутреннего резббообразования проводились измерения крутящего момента в трех режимах: при простом нарезании резббы без ультразвука, при нарезании с нефокусированным ультразвуком и, соответственно, с фокусированным. Сравнение средних значений крутящих моментов позволяет оценить эффективность действия ультразвука двух последних режимов по значениям коэффициентов

$$K_{\mathfrak{S}}^Y = \frac{M_{KP}^Y}{M_{KP}}; \quad K_{\mathfrak{S}}^{Y\Phi} = \frac{M_{KP}^{Y\Phi}}{M_{KP}}, \quad (10)$$

где M_{KP} — крутящий момент по средним экспериментальным значениям при обычном резббообразовании;

M_{KP}^Y — аналогичные значения в режиме нефокусированного ультразвука;

$M_{KP}^{Y\Phi}$ — то же, для фокусированного ультразвука.

Значения первых коэффициентов $K_{\mathfrak{S}}^Y$ известны по результатам предыдущих работы [4]. Значения коэффициентов $K_{\mathfrak{S}}^{Y\Phi}$ представляют интерес не столько для оценки эффективности ультразвука, сколько для получения конструктивных данных при разработке фокусирующих устройств. Зная уровни оценки этих коэффициентов, можно установить диапазон изменения предельные их значения. Выбрав желаемый уровень коэффициента $K_{\mathfrak{S}}^{Y\Phi}$, можно с помощью приведенных выше формул, установить значение соответствующего коэффициента K_I , а по нему и размерные параметры фокусирующей линзы.

Экспериментальные данные показывают, что уровень снижения крутящих моментов в случае фокусированного ультразвука в среднем на 8 — 12 % ниже, чем в режиме обычного ультразвука для резбб М8—М12, образуемых в деталях их алюминиевых сплавов.

Применение фокусирующих устройств приводит и заметному росту температуры в зоне резббообразования, что свидетельствует о процессах с более значительной концентрацией акустической энергии.

Фокусирующие элементы можно располагать не только в шпиндельной оснастке, но и применять специальные конструкции волноводов, передающие энергию ультразвуковых колебаний непосредственно к деталям с гнездами под резббу.

Список литературы

1. Физика и техника мощного ультразвука: Монография. В 3 т. Т. 2. Источники мощного ультразвука / под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1967. 379 с.
2. Каневский И.Н. Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн: Монография. М: Наука, 1977. 336 с.

3. Патент на полезную модель № 111790 РФ. МПК В23G 1/16. Устройство для нарезания внутренней резьбы с наложением ультразвуковых колебаний / С. Я. Березин, В. Н. Леонов, И. М. Кулеш. ГОУ ВПО ЗабГУ. Заявка 2011109991/02, заявл. 16.03.2011; опубл. 27.12.2011. Бюл. № 36.

4. Березин С. Я., Кулеш И. М. Влияние ультразвука на контактные напряжения деформации материала в процессах сборки соединений с крепежно-резьбообразующими деталями // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 9. С. 13–17.

5. Березин С. Я., Кулеш И. М. Динамические особенности процесса трения в резьбовом контакте с активацией фокусированным ультразвуком // Вестник ИрГТУ. № 9. 2011. С. 16–23.

References

1. Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka: Monografiya. V 3 t. T. 2. Istochniki moshchnogo ul'trazvuka / pod red. L. D. Rozenberga. M.: Nauka, 1967. 379 s.

2. Kanevskii I.N. Fokusirovanie zvukovykh i ul'trazvukovykh voln: Monografiya. M: Nauka, 1977. 336 s.

3. Patent na poleznuyu model' № 111790 RF. MPK В23G 1/16. Ustroistvo dlya narezaniya vnutrennei rez'by s nalozheniem ul'trazvukovykh kolebaniy / S. Ya. Berezin, V. N. Leonov, I. M. Kulesh. GOU VPO ZabGU. Zayavka 2011109991/02, zayavl. 16.03.2011; opubl. 27.12.2011. Byul. № 36.

4. Berezin S. Ya., Kulesh I. M. Vliyanie ul'trazvuka na kontaktnye napryazheniya deformatsii materiala v protsessakh sborki soedinenii s krepzhno-rez'boobrazuyushchimi detalyami // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. 2014. № 9. S. 13–17.

5. Berezin S. Ya., Kulesh I. M. Dinamicheskie osobennosti protsesssa treniya v rez'bovom kontakte s aktivatsiei fokusirovannym ul'trazvukom // Vestnik IrGTU. № 9. 2011. S. 16–23.

Статья поступила в редакцию 25.05.2015