

МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ РАСКРОЯ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЯ И АРАМИДА (КЕВЛАРА)

© 2024 г. А. А. Вьюгинова^{а, *}, С. Н. Вьюгинов^{б, **}, А. А. Новик^{б, ***}

^аСПбГЭТУ «ЛЭТИ», ул. проф. Попова 5, Санкт-Петербург, 197022 Россия

^бООО «ИНЛАБ – Ультразвук», ул. Чугунная 20, Санкт-Петербург, 194044 Россия

*e-mail: aavyuginova@etu.ru

**e-mail: inlab@utinlab.ru

***e-mail: novik.jr@gmail.com

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принята к публикации 19.12.2023 г.

Сотовые панели из алюминия и композиционных материалов – арамида, или кевлара, широко используются в авиационной, космической, автомобильной и других областях благодаря своим уникальным характеристикам: высокой прочности и жесткости, низкой плотности и хорошим теплоизоляционным свойствам. При этом механическая обработка изделий из сотовых материалов сопряжена с рядом трудностей, и одной из технологий, позволяющих эффективно решать задачи раскроя изделий из сотовых материалов, является ультразвуковая резка. В данной работе с помощью метода конечных элементов исследуются необходимые для проектирования частотные свойства инструментов для ультразвуковой резки изделий из сотовых материалов с рабочими частотами около 20 кГц с различными геометрическими параметрами для реализации раскроя различных вариантов сотовых конструкций. Приведены результаты анализа зависимостей волновых размеров специализированных треугольных и дисковых ультразвуковых инструментов от особенностей геометрии, представлены экспериментальные результаты для ряда разработанных вариантов.

Ключевые слова: ультразвуковая резка, сотовая панель, алюминий, арамид, кевлар

DOI: 10.31857/S0320791924010143 EDN: ZNNLOC

ВВЕДЕНИЕ

Сотовые панели, выполненные из композиционных материалов (aramид, или кевлара) и алюминия, широко применяются в аэрокосмической, автомобильной и других областях благодаря своим уникальным характеристикам, таким как высокая прочность, жесткость, низкая плотность и хорошие теплоизоляционные свойства. В то же время обработка сотовых материалов сопряжена с рядом трудностей, и одной из технологий, позволяющих эффективно решать задачи раскроя сотовых материалов, является ультразвуковая резка.

В технологии ультразвуковой резки сотовых материалов используются треугольные (для осуществления раскроя перпендикулярно изделию, рис. 1а) и дисковые ножи (для осуществления раскроя параллельно изделию, рис. 1б), которые

применяются в составе систем ручной, роботизированной и автоматической резки сотовых панелей.

Исследования технологии ультразвуковой резки проводились, в том числе отечественными авторами, со второй половины XX века [1–3]. Для исследования свойств ультразвуковых инструментов и ультразвуковых преобразователей могут применяться различные математические модели – одномерные [4, 5] и трехмерные [6] – и метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ широко и успешно используется для задач геометрии и особенности которых не удается с достаточной точностью описать математическими функциями, в случаях необходимости анализа взаимодействия нескольких физических полей [7, 8]. Ультразвуковые инструменты и процессы резания сотовых панелей из различных материалов в настоящий

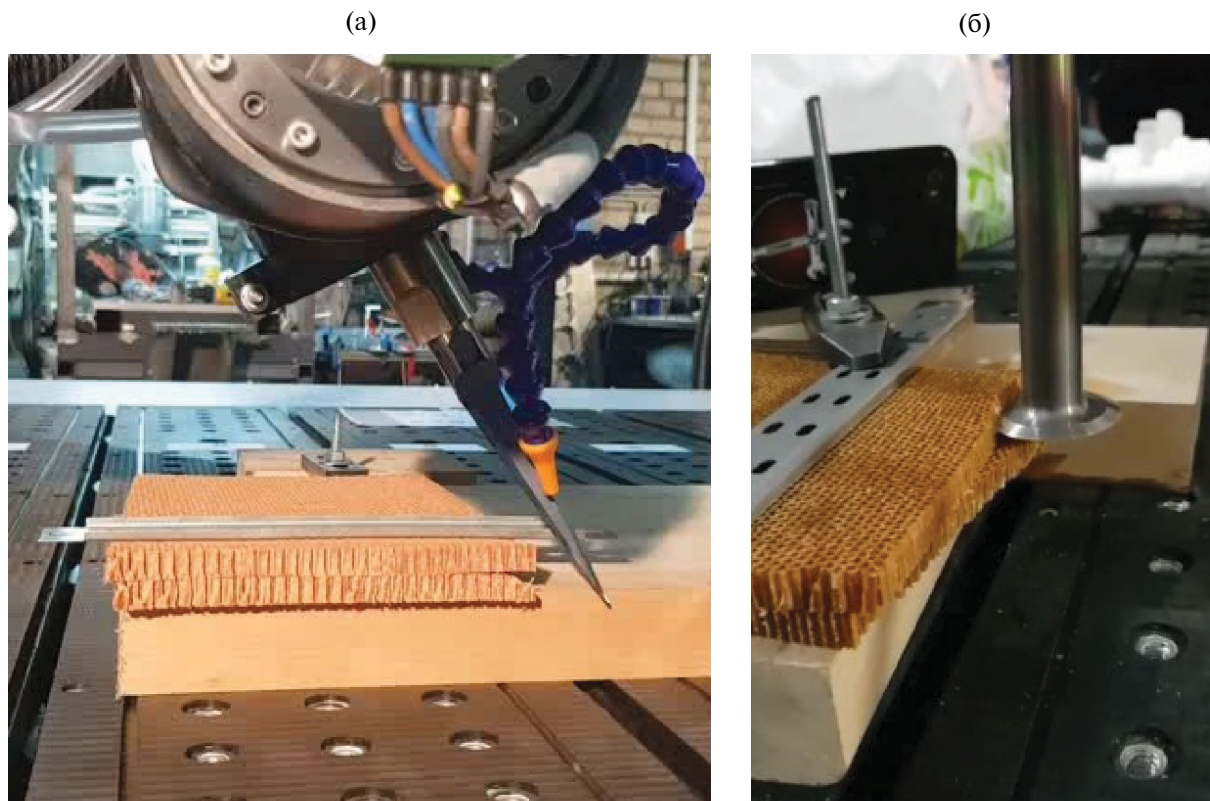


Рис. 1. Раскрой арамида ультразвуковым ножом: (а) – треугольный нож, (б) – дисковый нож.

момент активно исследуются. В работах [9, 10] рассматриваются треугольные ультразвуковые ножи, анализируется влияние ряда особенностей их конструкции на рабочие параметры. В работе [11] подробно рассмотрено влияние некоторых особенностей геометрии дискового ножа на его свойства. В работах [12–14] анализируется и оптимизируется процесс ультразвуковой резки сотовых материалов на основе МКЭ и экспериментальных исследований. Аналитические модели процесса резания сотовых материалов можно также найти в ряде публикаций для различных случаев [15–18]. В работе [19] осуществлено моделирование дискового ножа с зубчатой геометрией, в работе [20] рассматривается задача повышения качества позиционирования инструмента в процессе роботизированной ультразвуковой резки, в работе [21] анализируются возможности ультразвуковой системы для резки сотовых материалов на основе гигантской магнитострикции.

Конструкцию и режим колебаний треугольного ультразвукового ножа необходимо оптимизировать при заданном наборе требований к инструменту, таких как длина режущей части с учетом поддержания рабочей частоты, ширина торца ножа, что не было исследовано в упомянутых выше работах; частично эти вопросы были

рассмотрены в [22]. Для дискового ножа рассматривалось влияние особенностей геометрии диска без учета относительных размеров цилиндрической части инструмента, не рассматривались цельноточенные конструкции. Кроме того, предыдущие работы, связанные с моделированием ультразвуковых инструментов, носили в основном прикладной характер, в них не ставились задачи анализа общих физических закономерностей и влияния соотношения волновых размеров инструментов на их свойства.

В данной работе с использованием МКЭ получены общие закономерности, связывающие волновые размеры треугольных и дисковых ультразвуковых инструментов для резки сотовых панелей с относительными размерами режущей части, были экспериментально исследованы три варианта конструкции треугольного ножа и два варианта конструкции дискового.

ГЕОМЕТРИЯ И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Эскизы ультразвуковых инструментов для раскроя сотовых панелей представлены на рис. 2а–2б. На рисунках также обозначены анализируемые особенности геометрии инструментов.

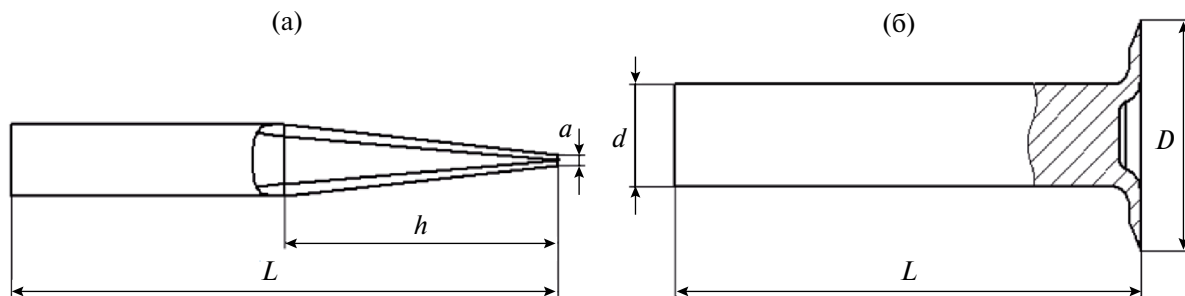


Рис. 2. Геометрия рассматриваемых ультразвуковых инструментов: (а) – треугольный нож, (б) – дисковый нож.

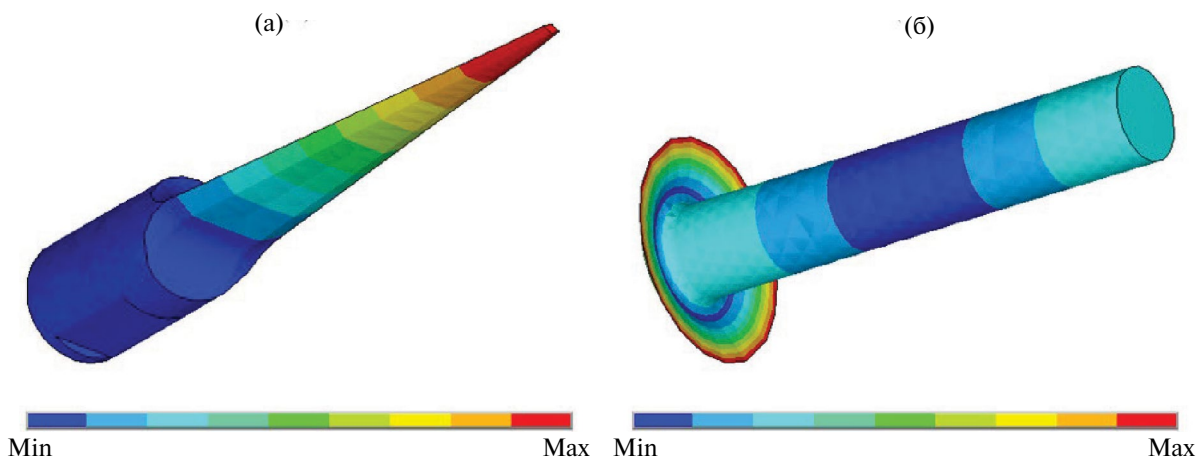


Рис. 3. Рассматриваемые моды колебаний ультразвуковых инструментов: (а) – треугольный нож, (б) – дисковый нож.

Для оценки влияния относительной длины режущей части треугольного ножа h/L на волновой размер ножа kL (где k – волновое число: $k = \omega/c$, ω – круговая частота, c – фазовая скорость звука в материале инструмента) были рассмотрены инструменты с длиной режущей части 55–115 мм с шагом 10 мм при условии необходимости сохранения рабочей частоты вблизи 20 кГц. Для анализа влияния ширины треугольного ножа a она рассматривается в качестве параметра кривой $kL(h/L)$ в диапазоне 2–5 мм с шагом 1 мм для трех вариантов соотношения h/L .

Для оценки влияния относительного размера режущей части дискового ножа D/d на волновой размер ножа kL были рассмотрены диаметры режущей части D , равные 50 и 100 мм, диаметры цилиндрической части d , равные 16, 22, 32 и 42 мм. Все остальные параметры геометрии диска, в частности, толщина (2.5 мм) и угол наклона режущей части (22.5°) зафиксированы. Рассматриваемые дисковые ножи являются сплошными, твердотельными, полностью выполненными из одного материала.

Перечисленные варианты геометрии ультразвуковых инструментов были исследованы с помощью МКЭ: свободные колебания были проанализированы с применением Ansys Multiphysics для следующих параметров материала: модуль Юнга, плотность и коэффициент Пуассона титана $E = 110$ ГПа, $\rho = 4500$ кг/м³, $\nu = 0.3$; для анализа был использован 3D-элемент с 10 узлами. Во всех случаях анализировалась основная продольная мода. На рис. 3а–3б в качественном виде приведены результаты моделирования рассматриваемых основных мод колебаний треугольного и дискового инструмента.

В следующем разделе результаты моделирования представлены в анализируемой форме в виде зависимостей волновых размеров инструментов от относительных размеров режущей части и рассматриваемых параметров. Функции демонстрируют общие закономерности и позволяют осуществлять анализ влияния геометрии ножей на их частотные свойства. Полученные зависимости дополнены результатами экспериментальных исследований, подтверждающими их характер.

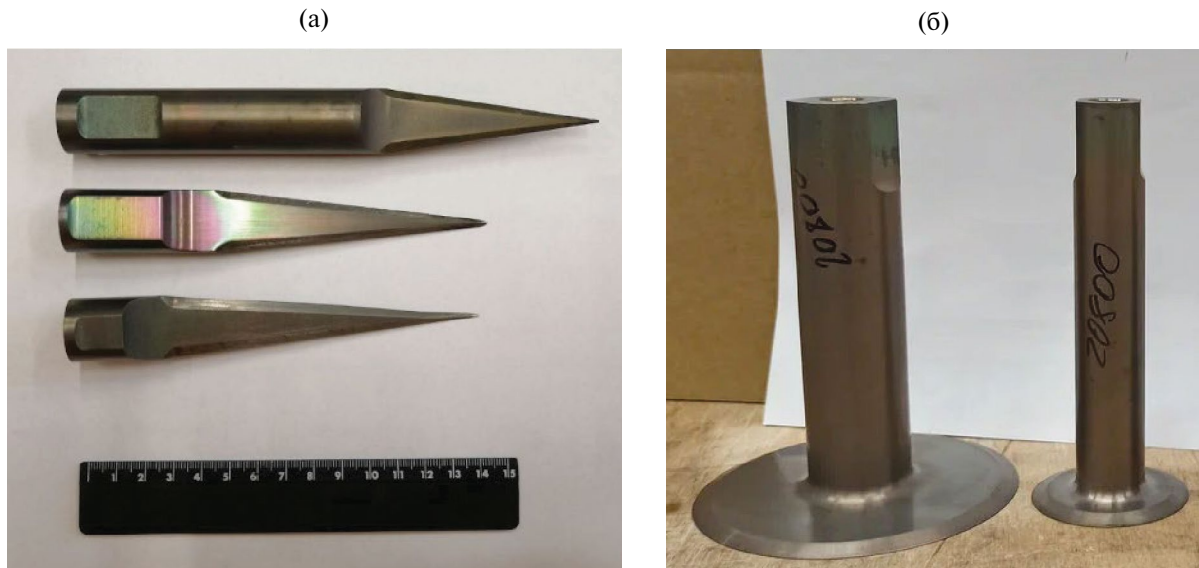


Рис. 4. Изготовленные ультразвуковые инструменты: (а) – варианты изготовленных треугольных ультразвуковых ножей, (б) – варианты изготовленных дисковых ультразвуковых ножей.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментального подтверждения полученных закономерностей было изготовлено несколько вариантов треугольных и дисковых ультразвуковых ножей – они представлены на рис. 4а-4б. Изготовленные треугольные ножи имеют различную длину режущей части в соответствии с различными задачами технологии раскроя сотовых материалов; аналогично изготовленные дисковые ножи имеют различный диаметр режущей части в соответствии с технологическими задачами, при этом все предназначены для работы на частоте около 20 кГц. Эксперименты проводились на ультразвуковом оборудовании производства ООО «ИНЛАБ – Ультразвук», состоящего из ультразвукового генератора мощностью 2 кВт и соответствующего магнитострикционного преобразователя, измерение рабочей частоты осуществлялось с помощью частотомера, встроенного в ультразвуковой генератор.

На рис. 5 представлена зависимость между волновой длиной kL и относительной длиной режущей части h/L для 7 точек, на рис. 6 представлена зависимость между волновой длиной kL и относительной длиной режущей части h/L для трех точек с изменяемым параметром ширины торца a , которым соответствуют описанные в предыдущем разделе модели. С помощью данных зависимостей можно определить геометрические параметры треугольного ножа с выбранной рабочей частотой и необходимой для конкретной технологии длиной режущей части и шириной торца. Как видно, по мере

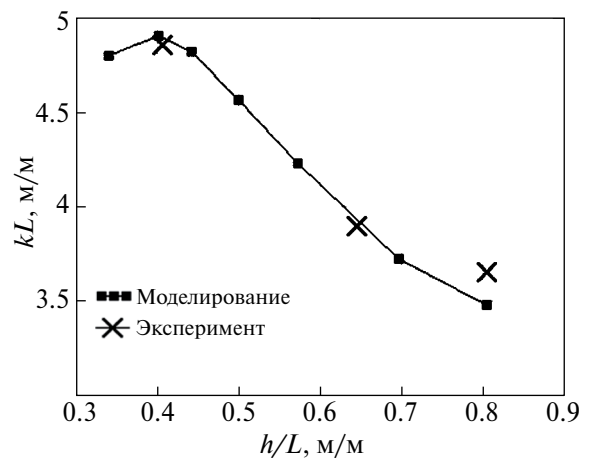


Рис. 5. Зависимость волновой длины треугольного ножа от относительной длины режущей части в сравнении с результатами эксперимента.

увеличения относительной длины режущей части волновой размер инструмента kL для большей части кривой уменьшается, но также видно, что эта функция имеет максимум вблизи $h/L = 0.4$ – при таком соотношении h и L волновой размер инструмента достигает максимума. Для оптимизации геометрии ножа необходимо учитывать особенности этой зависимости. Как видно на рис. 6, с увеличением ширины торца a волновой размер инструмента kL уменьшается, максимальное уменьшение волнового размера при увеличении значения параметра a от 2 до 5 мм, составляющее около 8.5%, наблюдается для максимальной рассмотренной

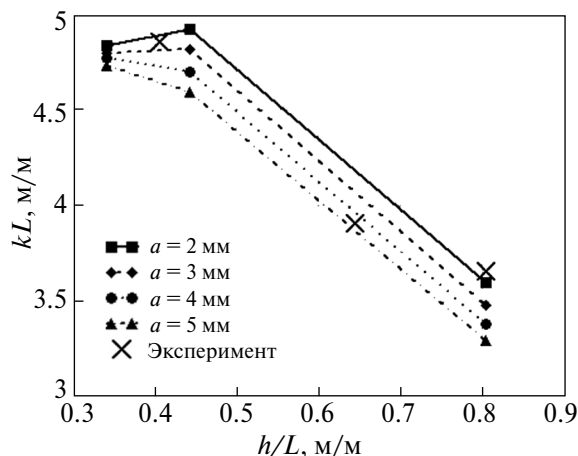


Рис. 6. Зависимости волновой длины треугольного ножа от относительной длины режущей части с изменяемым параметром ширины торца.

относительной длины режущей части вблизи $h/L = 0,8$. Для оптимизации геометрии ножа также необходимо учитывать, что амплитуда ультразвуковых колебаний больше для геометрии с меньшей шириной торца a , так как выше коэффициент усиления. На графики также нанесены точки, соответствующие экспериментально полученным значениям для изготовленных треугольных ножей, которые подтверждают характер полученных зависимостей.

На рис. 7 представлена зависимость волнового размера kL дискового ножа от отношения диаметров D/d : для диаметра режущей части диска $D = 100$ мм были рассмотрены варианты с диаметром цилиндрической части d , равные 22, 32, 42 мм, а для диаметра режущей части диска $D = 50$ мм были рассмотрены варианты с диаметром цилиндрической части d , равные 16 и 22 мм, что соответствует вариантам реально возможного исполнения таких конструкций. Как видно, по мере увеличения относительного размера D/d волновой размер kL дискового ножа увеличивается, что подтверждается и полученными экспериментальными точками.

Таким образом, результаты моделирования и результаты экспериментов близки для различных участков полученных зависимостей, что подтверждает возможность их использования при проектировании и оптимизации ультразвуковых инструментов данных типов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе результаты моделирования с помощью МКЭ ультразвуковых треугольных и дисковых ножей, предназначенных для раскроя сотовых панелей из алюминия и арамида (кевлара), представлены в виде графиков зависимости

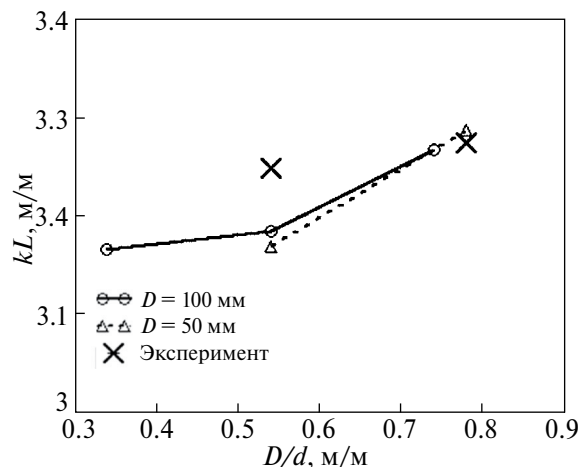


Рис. 7. Зависимость волновой длины дискового ножа от отношения диаметров инструмента в сравнении с результатами эксперимента.

волнового размера от относительного размера режущей части и показано, что:

- при увеличении относительной длины режущей части треугольного ножа, равной отношению длины режущей части к общей длине инструмента, волновой размер уменьшается для большей части зависимости, при этом функция имеет максимум;
- при увеличении ширины торца волновой размер треугольного ножа уменьшается;
- при увеличении относительного размера режущей части дискового ножа, равного отношению диаметра диска к диаметру цилиндрической части, волновой размер дискового ножа увеличивается;
- результаты экспериментов подтверждают полученные зависимости.

Полученные результаты демонстрируют общие закономерности частотных свойств для ультразвуковых ножей данного типа, они могут быть использованы для оптимизации геометрии и рабочей частоты ультразвуковых инструментов для реализации технологий раскроя сотовых панелей из различных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг Л.Д., Казанцев В.Ф., Макаров Л.О., Яхимович Д.Ф. Ультразвуковое резание. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
2. Борун Г.М., Поляков З.И. Величина разрежения в зоне резания ультразвукового инструмента // Акуст. журн. 1963. Т. 9. С. 231–232.
3. Ганева Л.И., Голямина И.П., Марголин В.С. Механическое сопротивление нагрузки при ультразвуковом резании хрупких материалов // Акуст. журн. 1973. Т. 19. С. 542–530.

4. Меркулов Л.Г., Харитонов А.В. Теория и расчет составных концентраторов // Акуст. журн. 1959. Т. 5. № 2. С. 183–190.
5. Сазонов И.А. Расчет трансформирующих свойств концентраторов продольных колебаний // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 1. С. 182–185.
6. Саркисян А.А., Саркисян С.О. Собственные колебания микрополярных упругих гибких пластин и пологих оболочек // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 2. С. 139–151.
7. Коробов А.И., Изосимова М.Ю., Агафонов А.А., Кокшайский А.И., Жостков Р.А. Упругие волны в цилиндрических металлических клиньях с разной геометрией // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 3. С. 251–257.
8. Yadav S., Gupta A. Parametric Study of Driver and Reflector of Single Axis Acoustic Levitator using Finite Element Method // Acoust. Phys. 2020. V. 66. № 3. P. 242–249.
9. Zhang Y., Shen Y., Lu Z. Design of an Ultrasonic Pointed Cutter // Appl. Mech. and Mat. 2014. V. 494–495. P. 569–572.
10. Wu X., Hu X., Yu B., Ji H., Lu Z., Xia X. Design of ultrasonic cutting tool for an ultrasonic assisted cutting process of Nomex honey-comb materials based on substitution method [in Chinese] // China Mech. Eng. 2015. V. 26. P. 809–813.
11. Xia Y., Zhang J., Wu Z., Feng P., Yu D. Study on the Design of Cutting Disc in Ultrasonic-assisted Machining of Honeycomb Composites // Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng. 2019. V. 611. P. 012032.
12. Sun J., Dong Z., Wang X., Wang Y., Qin Y., Kang R. Simulation and experimental study of ultrasonic cutting for aluminum honeycomb by disc cutter // Ultrasonics. 2020. V. 103. P. 106102.
13. Sun J., Kang R., Qin Y., Wang Y., Feng B., Dong Z. Simulated and experimental study on the ultrasonic cutting mechanism of aluminum honeycomb by disc cutter // Com. Struct. 2021. V. 275. P. 114431.
14. Sun J., Kang R., Guo J., Dong Z., Wang Y. Study on Machining Quality of Aluminum Honeycomb in Ultrasonic Cutting by Disc Cutter. // ASME. J. Manuf. Sci. Eng. 2023. V. 145. P. 051009.
15. Hu X.P., Yu B.H., Li X.Y., Chen N.C. Research on Cutting Force Model of Triangular Blade for Ultrasonic Assisted Cutting Honeycomb Composites // Procedia CIRP. 2017. V. 66. P. 159–163.
16. Xiang D., Wu B. Yao Y., Liu Z., Feng H. Ultrasonic longitudinal-torsional vibration-assisted cutting of Nomex honeycomb-core composites // J. Adv. Manuf. Technol. 2019. V. 100. P. 1521.
17. Kang D., Zou P. Wu H., Duan J., Wang W. Study on ultrasonic vibration–assisted cutting of Nomex honeycomb cores // J. Adv. Manuf. Technol. 2019. V. 104. P. 979.
18. Wang Y., Wang X., Kang R., Sun J., Jia Z. Dong Z. Analysis of Influence on Ultrasonic-assisted Cutting Force of Nomex Honeycomb Core Material with Straight Knife [in Chinese] // J. Mech. Eng. 2017. V. 53. P. 73.
19. Ahmad S., Zhang J., Feng P., Yu D., Wu Z., Ke M. Research on Design and FE Simulations of Novel Ultrasonic Circular Saw Blade (UCSB) Cutting Tools for Rotary Ultrasonic Machining of Nomex Honeycomb Composites // 2019 16th Int. Bhurban Conf. Appl. Sci. Tech. (IBCAST), Islamabad, Pakistan. 2019. P. 113.
20. Vakilinejad M., Olabi A. Gibaru O., Botton B. Geometrical error improvement of Aramid honeycomb workpieces in robot-based triangular knife ultrasonic cutting process // J. Adv. Manuf. Tech. 2020. V. 110. P. 523.
21. Ma K., Wang J., Zhang J., Feng P., Yu D., Ahmad S. A force-insensitive impedance compensation method for giant magnetostriction ultrasonic cutting system of Nomex honeycomb composites // Com. Struct. 2022. V. 294. P. 115708.
22. Vjuginova A.A., Durukan Y., Vjuginov S.N., Novik A.A. Design and Simulation of Ultrasonic Triangular Blades for Honeycomb Structures Cutting // 2021 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, P. 1293–1296.