

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 621.9
DOI**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ
ЭФФЕКТИВНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ****Шигин А.О.***ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск, e-mail: shigin_ao@mail.ru*

В статье показаны исследования состава, структуры процессов изготовления полимерных композиционных материалов. Выполнен аналитический обзор исследований в области физических и химических свойств полимерных материалов. Раскрыто содержание известных исследований, направленных на изучение механических свойств полимерных и композиционных материалов. В статье представлен анализ структуры и физико-механических свойств полимерных и композиционных материалов. Раскрыты особенности формирования межатомных связей в металлах и полимерных материалах. Выполнено сравнение процессов механической обработки резанием металлов и полимерных материалов. Рассмотрены энергетические подходы в проблеме разрушения межатомных связей внутри металлов и полимерных материалов в процессе резания. Выполнен анализ существующих технических решений и научных направлений в исследовании механизмов резания металлов и композиционных материалов с точки зрения повышения эффективности и качества процесса. В частности представлены передовые исследования в области механической обработки полимерных материалов с применением высокоскоростной обработки, предварительной обработки поверхности полимера, пропускания ультразвуковых колебаний внутри материала, а также наложения ультразвуковых вибраций на режущий инструмент. В статье сделаны выводы о перспективных подходах механической обработки композиционных материалов с целью повышения качества обработки, ресурса инструмента, снижения энергоёмкости процесса.

Ключевые слова: композиционные материалы, механическая обработка, энергоёмкость, качество обработки, трещинообразование, предварительная обработка, вибрационное точение, ультразвуковые колебания

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Интеллектуальные материалы и структуры» проекта «Разработка многофункциональных интеллектуальных материалов и структур на основе модифицированных полимерных композиционных материалов способных функционировать в экстремальных условиях» (Номер темы FEFE-2020-0015).

**PHYSICAL AND CHEMICAL PREREQUISITES FOR EFFICIENT
MECHANICAL PROCESSING OF COMPOSITE MATERIALS****Shigin A.O.***Siberian State University of Science and Technology named after M.F. Reshetnyova, Krasnoyarsk,
e-mail: shigin_ao@mail.ru*

The article shows studies of the composition and structure of the manufacturing processes of polymer composite materials. An analytical review of research in the field of physical and chemical properties of polymer materials was performed. The content of well-known studies aimed at studying the mechanical properties of polymer and composite materials is revealed. The article presents an analysis of the structure and physical and mechanical properties of polymer and composite materials. The features of the formation of interatomic bonds in metals and polymer materials are revealed. A comparison has been made of the processes of machining by cutting metals and polymer materials. Energy approaches to the problem of destruction of interatomic bonds inside metals and polymer materials during the cutting process are considered. An analysis of existing technical solutions and scientific directions in the study of cutting mechanisms for metals and composite materials was carried out from the point of view of increasing the efficiency and quality of the process. In particular, advanced research is presented in the field of mechanical processing of polymer materials using high-speed machining, pre-treatment of the polymer surface, transmission of ultrasonic vibrations within the material, and the application of ultrasonic vibrations to the cutting tool. The article draws conclusions about promising approaches to mechanical processing of composite materials in order to improve the quality of processing, tool life, and reduce the energy intensity of the process.

Keywords: composite materials, machining, energy intensity, processing quality, cracking, pre-treatment, vibration turning, ultrasonic vibrations

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia for the implementation by the team of the scientific laboratory “Intelligent Materials and Structures” of the project “Development of multifunctional intelligent materials and structures based on modified polymer composite materials capable of functioning in extreme conditions” (Topic number FEFE-2020-0015).

Композиционные материалы (КМ) представляют собой полимер, армированный значительно более прочными волокнами [1-4]. Основу КМ составляет матрица, в качестве которой используются технологически удобные в применении полимеры, которые имеют пластичные или текучие свойства на стадии изготовления КМ и приобретают прочностные свойства после изготовления КМ [5, 6]. Важнейшей характеристикой материала матрицы является способность связывать и удерживать инородные армирующие волокна за счет адсорбции подвижных молекул на поверхности жестких тел, формирования адгезионных сил, а также химических связей образованного твердого полимера [7]. Внутренняя структура полимеров существенно отличается от структуры металлов. В металлах связь отдельных атомов происходит за счет облака свободных электронов атомов кристаллической решетки и при этом существует синергетическое взаимодействие близлежащих атомов [8]. Это объясняет сочетание высокой жесткости структуры с высокой прочностью и упругостью. Кроме того в металлах образуется четкая кристаллическая решетка. А в сплавах образуются твердые растворы, вызывающие формирование фаз, которыми можно управлять с целью получения существенно различных механических и других физических свойств.

Связь атомов в полимерах происходит внутри длинных химических молекул, состоящих из различных химических элементов. Это обуславливает значительно большую упругость полимеров по сравнению с металлами и сплавами, что приводит к снижению жесткости [9, 10]. При этом прочность и модуль упругости полимеров значительно меньше аналогичных параметров металлов и сплавов, не имеющих дефектов. При том, что внутри одной полимерной молекулы практически отсутствует синергетическое взаимодействие между отдельными атомами в связи с их отдаленностью и низкой атомной массой химических элементов, присутствует сложное взаимодействие между полимерными молекулами. Данное взаимодействие дает возможность углублять фундаментальные возможности в области формирования энергоэффективных и синергетически связанных структур [11-13]. Так возможно формирование кристаллической структуры и поперечных связей полимерных молекул [14], модифицирование структуры и свойств на различных стадиях взаимодействия молекул под действием изменяющихся внешних факторов. Все указанные факторы непосредственно влияют на физические процессы, сопро-

ждающие процесс механической обработки металлов и сплавов, полимеров и композиционных материалов.

Цель исследования – в связи со структурными особенностями композиционных материалов, наличием реологических процессов, высокой вязкостью полимерных материалов и их низкой теплопроводностью необходимо проанализировать существующие научные подходы, направленные на повышение качества и снижение энергоемкости механической обработки композиционных материалов.

Материалы и методы исследования

Процесс резания металлов связан с образованием зоны пластической деформации и трещины [15, с. 15-60] за счет отдаления контактирующих атомов или зерен твердого раствора под действием механической и тепловой энергии, передаваемой от режущего тела к металлу. При этом трещина образуется путем концентрации напряжений в области дефекта, многократно ослабляющего материал, и рост трещины происходит закономерно и предсказуемо по причине существенной изотропности структуры.

По причине более сильных и более жестких химических связей между соседними атомами внутри одной полимерной молекулы в полимерах их разрушение происходит иначе. Химические связи полимеров не дают возможности постепенно отдалять соседние атомы. Вместо этого растягиваются связи одновременно в целой полимерной молекуле. В конечном итоге происходит передача механической энергии от режущего тела и накопление внутренней энергии в определенном участке молекулы и разрушается химическая связь после существенной упругой деформации всего полимера на некотором участке контакта с режущим телом [16-18]. Значительно большая упругость при взаимодействии множества полимерных молекул, происходящем в полимерах по сравнению с металлами в процессе резания приводят к более значительному выделению тепла. Данная тепловая энергия образуется из механической энергии, передаваемой от режущего тела за счет длительного упругого сопротивления полимерных молекул.

В связи с этим первая фундаментальная задача для повышения энергоэффективности процесса резания полимеров заключается в уменьшении времени упругой деформации цепочки атомов под действием режущего тела. С уменьшением упругой деформации снижается количество энергии, преобразуемой в тепло. Данная задача может быть реализована двумя путями.

Первый подход заключается в уменьшении количества атомов в отдельных полимерных молекулах с целью уменьшения и ослабления связей полимерных молекул между соседними полимерными молекулами. Данный способ применяется в России и за рубежом в таких формах как механическое предварительное ослабление поверхностного слоя полимера, а также обработка полимера физическими методами [19, 20] с целью разрушения или укорочения полимерных молекул. Одним из таких методов является предварительная обработка полимера ультразвуковыми колебаниями, магнитными и электрическими полями, электромагнитными импульсами [21].

Второй подход заключается в уменьшении пути в цепочке атомов, по которому передается волна энергии, способствующей упругой деформации полимера. Цель данного подхода заключается в ускорении процесса разрыва химических связей и переход в область хрупкого и квазихрупкого разрушения. Ускорение данного процесса возможно за счет уменьшения промежутка времени между началом приложения усилия от режущего тела к полимерной молекуле и моментом разрыва химической связи. Данный промежуток времени может быть уменьшен за счет увеличения скорости приложения усилия от режущего тела. В этом случае существенно уменьшается упругая деформация и пропорционально снижается количество энергии, затраченной на процесс резания и соответственно количество выделяемого тепла. Ускорение процесса резания сопровождается существенным уменьшением ударной вязкости полимера [22] и приближению типа процесса разрушения к хрупкому. Хрупкое разрушение полимера по причине отсутствия четкой кристаллической решетки сопровождается лавинообразным ростом трещин, размер которой l коррелирует с количеством прикладываемой энергии E и скоростью передачи этой энергии c (1).

$$l = f(E, c), \quad (1)$$

где l – длина трещины; E – энергия, передаваемая материалу в процессе его разрушения; c – скорость звука в материале.

Композиционный материал представляет собой структурированный в той или иной степени массив, содержащий армирующие волокна. Армирующие волокна представляют собой четко структурированные образования с ненарушенной кристаллической решеткой. По причине отсутствия или минимизации дефектов, такие материалы как углеродные нити, стекловолокно и др. имеют очень высокую прочность, зна-

чение которой приближается к теоретической и сопоставимую с модулем упругости материала [23, с. 175-212]. При этом армирующие волокна не имеют высокой структурной жесткости и прочности при сжатии и поперечном сдвиге. Поэтому армирующие волокна могут выполнять свою роль только в структуре полимера, который содержит в своей структуре данные волокна. При этом матрица объединяет армирующие волокна в единое целое, КМ приобретает высокую прочность на растяжение, а также на сжатие и поперечный сдвиг [24]. Однако КМ теряет четкую кристаллическую структуру и приобретает дефекты внутри матрицы и на границе матрицы и армирующих волокон. При этом армирующие волокна передают механическую нагрузку матрице посредством сил адгезии от атомов армирующего волокна к атомам адгезионного слоя и в тело матрицы, которая перераспределяет нагрузку за счет своих упругих свойств между другими армирующими волокнами [7]. Кроме того, КМ приобретает существенно анизотропные свойства на макроуровне при упорядоченном расположении армирующих волокон, либо на микроуровне при хаотичном их расположении.

Процесс резания композиционного материала сопровождается упругой деформацией полимера матрицы с большим выделением тепла. Наличие в структуре КМ армирующих волокон приводит к значительному увеличению упругой деформации, поскольку армирующее волокно имеет ненарушенную кристаллическую решетку и его разрушение происходит принципиально иначе, чем в полимерах. Армирующие волокна представляют собой выращенные кристаллы, содержащие в структуре атомы или химические молекулы [25]. Поскольку в армирующих волокнах отсутствуют дефекты, то данный материал разрушается не от места концентратора напряжений, а посредством растягивания межатомных кристаллических связей, что многократно увеличивает количество энергии, необходимое для разрыва связей в области приложения механической нагрузки. Отличие кристаллической связи заключается в том, что одновременно работает значительно большее количество связей, чем в полимерных молекулах, а также имеется синергетический эффект за счет взаимодействия атомов решетки с электронами соседних и удаленных атомов этой решетки. Все эти факторы приводят к тому, что режущее тело, встречая на своем пути армирующее волокно, натягивает его как струну, существенно деформируя и волокно и матрицу. Но разрушение материала происходит только по-

сле разрушения связей кристаллической решетки армирующего волокна после значительной упругой деформации всего КМ [26]. Кроме того, возникает такой эффект, что на армирующее волокно, закрепленное в матрице КМ силами адгезии, осуществляется воздействие, как на отдельное тело, нежели закрепленное в упругой массе. Разрушение нежестко закрепленного тела неизбежно приводит к повреждению структуры материала вблизи места контакта и на некотором удалении от него. Процесс такого резания напоминает разрыв слаботянутой струны внутри менее жесткой среды. Армирующее волокно (АВ) при этом может разрезать матрицу, терять адгезионные связи и нарушать целостность КМ на микроуровне. Кроме того, разрыв тонкого протяженного тела без ослабленных точек может рваться в непредсказуемых местах, что существенно снижает качество обрабатываемой поверхности КМ и наличие на обработанной поверхности фрагментов порванных волокон.

Результаты исследования и их обсуждение

В связи с представленным анализом первая фундаментальная задача для повышения энергоэффективности процесса резания КМ, коррелирует с аналогичной задачей при резании полимеров и заключается в уменьшении времени упругой деформации цепочки атомов матрицы и армирующих волокон под действием режущего тела с целью увеличения жесткости системы матрица-АВ и перевода механизма разрушения армирующих волокон в область квазихрупкого разрушения. Реализация данной задачи позволит уменьшить энергоемкость процесса резания КМ за счет уменьшения потерь энергии на упругую деформацию КМ. Снижение области распространения волны деформации по разрезаемому армирующему волокну и матрицы позволит локализовать область разрушения волокна и матрицы и повысить качество обрабатываемой поверхности. Снижение упругой деформации армирующего волокна будет способствовать снижению повреждения матрицы и разрушения адгезионных связей между АВ и матрицей. Снижение энергоемкости процесса резания приведет к снижению тепловыделения и износа режущего инструмента за счет уменьшения энерго-временных параметров взаимодействия режущей и разрезаемой поверхностей при отсутствии изменений твердости и абразивности материалов.

Данная задача для КМ может быть также реализована двумя путями. Первый под-

ход – уменьшение длины и количества атомов в отдельных полимерных молекулах, а также уменьшение и ослабление связей полимерных молекул между соседними полимерными молекулами [18, 19]. Вторым подходом заключается в уменьшении цепочки атомов, передающих волну упругой энергии, способствующей упругой деформации полимера и АВ. Техническая реализация второго подхода как правило показывает более значимые перспективы для повышения качества обрабатываемой поверхности и имеет три основных направления.

Первое направление связано с резанием на высокой скорости за счет достижения скорости вращения детали или режущего инструмента более 15 000 об/мин [27-29]. При этом линейная скорость резания будет существенно зависеть от диаметра детали или режущего инструмента, что потребует настраивать кинематические параметры конкретно под выполняемую технологическую операцию или даже в процессе этой операции. Техническая реализация данного подхода также осложняется повышенными энергозатратами, требованиями к безопасности процесса и сложности контроля качества обработанной поверхности. Энергоемкость процесса резания увеличивается по мере увеличения скорости резания [30]. Также с увеличением скорости резания может снижаться точность обработки и качество обрабатываемой поверхности

Второе направление связано с применением механического колебательного воздействия через режущий инструмент к обрабатываемому материалу в процессе точения или фрезерования. Данное направление появилось во второй половине XX века при обработке металлов [31, 32]. Применительно к КМ в настоящее время исследуется в научных организациях (СТАНКИН, ИМАШ, МГТУ Баумана, ТПУ). При этом в Китае и Индии данное направление получило широкое распространение [33, 34] и активно развивается в настоящее время. Наложение ультразвуковых колебаний широко применяется при обработке композиционных и керамических изделий в области протезирования и стоматологии в медицине [35, 36]. Переменное силовое воздействие с высокой скоростью сочетает в себе возможности выполнения задачи снижения энергоемкости резания КМ, снижения износа режущего инструмента, достижения высокого качества обработанной поверхности за счет контролируемого количества энергии, передаваемой в зону образования трещины в каждый цикл. Исследования показывают, что скорости приложения нагрузки, вызывающей хрупкое разрушение КМ

соответствуют параметры ультразвуковых колебаний [37]. Колебания более низких частот вызывают побочные явления в виде резонанса режущего инструмента, недостаточная скорость приложения нагрузки [38, с. 204-207]. Технические трудности реализации данного подхода связаны с необходимостью разработки узла крепления режущего инструмента (фрезы) с возможностью одновременной передачи крутящего момента и возвратно-поступательного колебательного движения с частотой не менее 20 кГц. Для достижения энергоэффективного режима обработки также требуется поиск режима авторезонанса режущей системы станка с целью снижения рассеивания энергии колебательной системы. В настоящее время в Мире известны и находят широкое применение источники ультразвуковых колебаний с автоподстройкой режима авторезонанса [39].

Третье направление связано с пропусканьем звуковых колебаний внутри КМ в процессе механической обработки. Данное направление исследовалось в р. Беларусь [38, с. 136-225] при обработке металлов. Автором исследованы энергетические параметры ультразвуковых колебаний, технологические характеристики и качество обработанной поверхности. Применительно к обработке полимеров и КМ данный подход также имеет существенные перспективы. В качестве преимущества можно отметить простоту технической реализации, независимо от формы обрабатываемой детали. Однако пропускание ультразвука в КМ может вызывать модификацию структуры и свойств [40]. В частности возможно уменьшение размеров полимерных молекул в результате их деления, образование новых структурных образований и химических связей. Данные изменения могут иметь как положительное, так и негативное значение применительно к физико-механическим и эксплуатационным характеристикам КМ. В связи с этим необходимо исследование влияния ультразвука с различными энергетическими параметрами на свойства и структуру полимеров и КМ. В результате пропускания ультразвуковых колебаний внутри полимера может увеличиваться его трещиностойкость, меняться упругие и другие физические свойства [41]. Но при определенном воздействии ультразвук может способствовать разрушению полимерных молекул и ослаблению материала [18].

Выводы

1. Для повышения качества обработки необходимо использовать методы с дозированным подводом энергии, преобразуе-

мой в механическую энергию разрушения и трещинообразования.

2. Также для повышения качества обработки композиционных материалов необходимо учитывать изменение реологических свойств КМ и их составляющих при динамическом воздействии. В частности повышение скорости механической обработки связано именно с изменением реологических характеристик, ударной вязкости матрицы и волокон в момент воздействия. Однако существенная скорость обработки наоборот может приводить к снижению качества обработанной поверхности по причине неконтролируемого роста трещин.

3. Для повышения качества обработки необходимо снижать глубину разрушения или длину трещины, образуемой в один заход. А именно необходимо снижать подачу, усилие длительного воздействия, необходимо регулировать углы резания для уменьшения заглубления трещины в матрицу.

4. Для снижения энергоемкости процесса необходимо применять дозированное преобразование энергии в механическую энергию разрушения материала при помощи наложения колебательного воздействия на режущий инструмент или на сам материал, предварительной механической или другой физической обработки с целью нанесения ограниченного повреждения.

5. Дополнительные возможности дает предварительная обработка КМ с целью частичного разрушения или ослабления поверхности, а также с целью модификации структуры и моделирования физических свойств. Однако данный подход должен применяться с учетом специализированного назначения конкретной детали, ее физико-механических характеристик, что существенно удорожает применение данного подхода и ограничивает его массовое применение.

Список литературы

1. Hu N. Composite sand their applications // Croatia: In-tech Open. 2012. DOI: 10.5772/3353.
2. Erofeev V. Frame construction composites for buildings and structures in aggressive environments // Procedia Engineering. 2016. № 165. P. 1444–1447.
3. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 118 с.
4. Маркин В.Б. Конструкции из композиционных материалов: учебное пособие. Барнаул: АлтГТУ, 2022. 253 с.
5. Schuster J., Duhovic M., Bhattacharyya D. Manufacturing and processing of polymer composites // Synthetic Polymer – Polymer Composites. 2012. № 2. P. 1–38.
6. Răzvan Petre, Nicoleta Petrea, Gabriel Epure, Teodora Zecheru. Polymer composite material sand applications for chemical protection equipments // International Conference Knowledge-Based Organization. 2015. Vol. XXI. № 3. P. 873–887.

7. Горбаткина Ю.А. Иванова-Мумжиева В.Г. Адгезия дисперсно-наполненных эпоксидов к твердым телам // *Механика композитных материалов*. 2012. № 2. С. 235–248.
8. Jie Feng, Surendar R. Venna, David P. Hopkinson. Interactions at the interface of polymer matrix-filler particle composites // *Polymer*. 2016. Vol. 103. № 26. P. 189–195.
9. Irzhak V. Intermolecular interactions in polymer system sand a model of physical network // *Russian Chemical Reviews*. 1997. Vol. 66. № 2. P. 167–186.
10. Zeshuai Yuan, Zixing Lu. Numerical analysis of elastic-plastic properties of polymer composite reinforced by wavy and random CNTs // *Computational Materials Science*. 2014. Vol. 95. P. 610–619.
11. Grimes G.C. Tape composite material allowable application in airframe design // *Composites Engineering*. 1993. Vol. 3. № 7-8. P. 777–804.
12. Berladir K.V., Budnik O.A., Dyadyura K.A., Svider-sky V.A., Kravchenko Ya.O. Physicochemical principles of the technology of formation of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene – a review // *High Temperature Material Processes*. 2016. Vol. 20 № 2. P. 157–184.
13. Баурова Н.И. Зорин В.А., Приходько В.М. Оценка синергетического эффекта процесса накопления повреждений в полимерных материалах с использованием теории катастроф // *Теоретические основы химической технологии*. 2016. Т. 50, № 1. С. 122.
14. Snedden Peter, Cooper Andrew I., Scott Keith, Winter-ton Neil. Cross-linked polymer-ionic liquid composite materials // *Macromolecules*. 2003. Vol. 36. № 12. P. 4549–4556.
15. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2012. 304 с.
16. Ward I.M., Sweeney J. Mechanical properties of solid polymers. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2013. 477 p.
17. Баженов С.Л. Механика и технология композиционных материалов. Долгопрудный: Интеллект, 2014. 332 с.
18. Еренков О.Ю. Исследование характера стружкообразования при точении термопластов // *Пластические массы*. 2020. № 3-4. С. 46–48.
19. Еренков О.Ю. Комбинированные способы токарной обработки полимерных композиционных материалов: монография. Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2015. 277 с.
20. Староверов О.А. Деформирование и разрушение полимерных композитов в условиях комплексных механических воздействий: дис. ... канд. тех. наук. Пермь, 2020. 140 с.
21. Еренков О.Ю., Никищечкин В.Л. Совершенствование технологии производства полимерных композиционных материалов. Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2013. 123 с.
22. Лушечкин Г.А. Моделирование ударной вязкости полимерных материалов // *Пластические массы*. 2016. № 9-10. С. 24–27.
23. Тагер А.А. Физико-химия полимеров: учебное пособие для хим. фак. ун-тов. М.: Научный мир, 2007. 573 с.
24. Mingchun Fu, Xishan Yu, Shichao Ying. Mechanical properties testing of carbon fiber reinforced composites // *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2022. Is. 11. P. 286–294.
25. Köhler T., Brüll R., Pursche F., Langgartner J., Seide G., Gries T. High strength and low weight hollow carbon fibres // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 254. P. 1–8.
26. Zhukova I., Flik E., Shubina E., Mishurov V., Kashp-arov I. Synergism of the action of some stabilisers against the destruction of polymer materials // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 273. P. 1–8.
27. Ярославцев В.М. К вопросу о возможности применения высокоскоростной обработки полимерных композиционных материалов // *Технология и оборудование механической и физико-технической обработки*. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 59–70.
28. Грабин В.Г., Подураев В.Н., Короткевич Ю.Н. Исследование процесса сверхскоростного резания и установка взрывного типа для его осуществления // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 1964. № 11. С. 98–105.
29. H. Schulz, G. Spur. High Speed Turn-Milling – A New Precision Manufacturing Technology for the Machining of Rotationally Symmetrical Workpieces // *CIRP Annals*. 1990. Vol. 39. Is. 1. P. 107–109.
30. Uhlmann Eckart, Richarza Sebastian, Sammlera Fiona, Hufschmid Ralph. High Speed Cutting of carbon fibre reinforced plastics // *Procedia Manufacturing*. 2016. № 6. P. 113–123.
31. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Пер. с яп. С.Л. Масленникова. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
32. А.с. 246278 СССР, МПК В 23b Устройство для дробления стружки / Коновалов Е.Г., Молочко В.И., По-годаев В.Н., Корольков И.С. 1274587/25-8; заявл. 13.10.68. Минский радиотехн. ин-т. опубл. 11.06.69 // *Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки*. 1969. № 20. С. 137–138.
33. Zhena Li, Songmei Yuan, Chong Zhang. Research on the rotary ultrasonic facing milling of ceramic matrix composites // *Procedia CIRP*. 2016. № 56. P. 428–433.
34. Kataria Ravinder, Singh Ravi Pratap, Kumar Jatinder. An experimental study on ultrasonic machining of tungsten carbidecobalt composite materials // *AIMS Materials Science*. 2016. Vol. 3, Is. 4. P. 1391–1409.
35. Халиуллина А.В., Хайрутдинов Б.И. Ультразвук в медицине: учебное пособие. Казань: Изд-во Казанского университета, 2022. 116 с.
36. Шнип Е.В., Наумович С.А. Применение ультразвуковых технологий в ортопедической стоматологии // *Современная стоматология*. 2016. № 1. С. 2–5.
37. Kuruc Marcel Machining of Composite Materials by Ultrasonic Assistance // *Advances in science and technology*. 2020. Vol. 14. Is. 2. P. 140–144.
38. Данильчик С.С., Иващенко С.А., Каштальян И.А., Куптель В.Г., Молочко В.И., Шелег В.К. Вибрационное точение конструкционных сталей. Минск: БНТУ, 2018. 244 с.
39. Zhang Jianguo, Long Zhili, Can Member, Member Wang, Ren Feng, Li Yangming, Member Senior. Novel optimization approach in ultrasonic machining: Unilateral compensation for resonant vibration in primary side // *IEEE Access*. 2019. № 99. P. 1–9.
40. Kolosov A.E., Sivetskii V.I., Kolosova E.P., Vanin V.V., Gondlyakh A.V., Sidorov D.E., Ivitskiy A.I. Creation of structural polymer composite materials for functional application using physicochemical modification // *Advances in Polymer Technology*. 2019. № 86. P. 1–12.
41. Нгок Т.Н., Капралов В.М., Коленко Г.С. Влияние частот нагружения на сопротивление усталости материалов // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2019. Т. 25, № 2. С. 68–77.