

УДК 621.9.048.6
DOI: 10.12737/20815

В.М. Приходько, чл.-кор. РАН,
Д.С. Фатюхин, д.т.н.
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
125319, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 64)
E-mail: mitriy2@yandex.ru

Ультразвуковые технологии на современном этапе развития машиностроения

Рассмотрен спектр высокоэффективных ультразвуковых технологий, широко применяемых в современном машиностроении для производства изделий и повышения их качества. Приведен обзор перспективных разработок в области технологического применения ультразвука и создания новых технологий.

Ключевые слова: ультразвук; машиностроение; кавитация; акустические потоки; поверхностное деформирование; аддитивные технологии.

V.M. Prikhodko, Corr. Member of RAS,
D.S. Fatyukhin, D.Eng.
(Moscow Road-Transport Technical University (MADI),
64, Leningradsky Avenue, Moscow 125319)

Ultrasonic techniques at current stage of mechanical engineering development

The range of high effective ultrasonic techniques widely – used in modern mechanical engineering for produce manufacturing and their quality increase is considered. The review of promising developments in the field of ultrasound technological application and new techniques creation is shown.

Keywords: ultrasound; mechanical engineering; cavitation; acoustic flows; surface deformation; additive techniques.

Постоянно возрастающие требования к надежности, экономичности и экологичности транспортной техники диктуют необходимость создания и внедрения новых эффективных энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования на всех этапах жизненного цикла изделий. Наиболее востребованными являются технологии, обеспечивающие требуемое воздействие на объект обработки на микро- и субмикроразмерном уровне. Использование технологий масштабы воздействия которых соизмеримы с размерами кристаллических решеток и даже элементарных частиц, на современном этапе развития транспортного машиностроения является чрезвычайно актуаль-

ным. Одним из технологических направлений формирования свойств изделий на подобном уровне является использование электро-физико-химических методов обработки, среди которых достойное место занимают ультразвуковые технологии, позволяющие формировать совокупность требуемых эксплуатационных свойств изделий.

Применение ультразвуковых колебаний в технологических процессах нашло широкое промышленное применение, охватив практически все процессы, начиная от металлургии и заканчивая машиностроением [1].

Повышение эксплуатационных свойств изделий транспортного машиностроения – ком-

плексная задача, решаемая, как при их производстве, так и при последующем сервисном обслуживании и ремонте техники.

Мировые тенденции развития техники и современная законодательная база обязывают производителей наряду с обеспечением качества на этапе производства обеспечивать требуемые свойства изделий и на других этапах их жизненного цикла. Так, например, действующий стандарт ISO 22628 предписывает производственным предприятиям автомобильной отрасли выпускать транспортные средства, которые не менее 85 % по массе пригодны для повторного использования или переработки для вторичного использования.

Сравнительная оценка затрат энергии и природных ресурсов показала, что, по сравнению с производством, вторичное использование позволяет снизить затраты не менее чем на 40 %, а восстановление и повторное использование – не менее чем на 95 %.

Учитывая вышеизложенное, можно констатировать, что по мере ужесточения экологических требований к выпуску предприятиями продукции кроме производственных возрастает востребованность технологий ремонтных, восстановительных и перерабатывающих.

Использование ультразвуковых технологий позволяет осуществлять технологическое воздействие на поверхностные слои конструкционных материалов, обеспечивающее формирование требуемых свойств. Основными преимуществами использования ультразвуковой обработки являются возможность воздействия на поверхности материалов на макро-, микро- и субмикроуровне, отсутствие необходимости использования дорогостоящих и экологически вредных реагентов и расходных материалов, широкие возможности автоматизации процессов.

Основные направления применения ультразвуковых технологий в машиностроении

Применение ультразвука на стадии *получения материалов* позволяет по существу получить новые материалы, обладающие высокими антифрикционными свойствами или с повышенным уровнем прочностных свойств. Воздействие ультразвука на расплавы позволяет значительно снизить как количество пузырьков, так и содержание растворённого газа, и в результате, увеличивается прочность материала и другие его механические характеристики. Кроме того, при воздействии ульт-

развуковых колебаний на материалы в процессе кристаллизации значительно уменьшается размер зерна, что также ведет к существенному улучшению физико-механических свойств материала.

Одним из способов повышения качества *сварных соединений* является наложение ультразвуковых колебаний в процессе сварки на элементы свариваемого соединения или сварочный электрод. Наложение ультразвуковых колебаний на элементы свариваемого соединения обеспечивает снижение сварочных деформаций, уменьшение пористости шва, что позволяет повысить прочность и качество сварного соединения.

Способы, при которых ультразвуковые колебания вводят в сварочную ванну через электрод, создают эффект удержания капли расплавленного металла, предотвращая её отрыв под действием электромагнитных сил, которые действуют в дуговом промежутке. При отключении ультразвуковых колебаний капля, обработанная ультразвуком, вносится в сварочную ванну и формирует шов, что позволяет резко снизить коэффициент потерь.

Ультразвуковая сварка металлов позволяет получить соединение двух металлов в твердой фазе (без плавления) под действием тангенциальных колебаний и нормальных усилий. Образование соединений происходит при одновременном сжатии и колебательном движении инструмента.

Совместное действие постоянных и переменных напряжений приводит к ускорению пластического деформирования наиболее высоких микронеровностей и сближению поверхностей. Одновременно дробятся окисные пленки на поверхности металла и образуются зоны физического контакта двух свариваемых поверхностей. С течением времени площадь зон схватывания увеличивается. В дальнейшем в процессе сварки образуются и растут на границе общие зерна металла, т.е. происходит процесс рекристаллизации.

Ультразвуковая сварка полимеров связана с локальным выделением тепла на границе контакта. В отличие от сварки металлов сварка пластмасс осуществляется инструментом, колеблющимся нормально к поверхности. Критерием сварки полимеров, также как и металлов, является прочность соединения и отсутствие прожогов. Операции сварки полиэтиленовой пленки, трикотажно-лавсанового полотна, полихлорвиниловой пленки производятся путем непрерывного перемещения изделия относительно инструмента.

Эффективность применения ультразвука в процессах **обработки металлов давлением** определяется двумя основными факторами. Это снижение трения на границе инструмент–заготовка и уменьшение сопротивления пластическому деформированию. Анализ технологических процессов обработки металлов давлением (волочение, прессование, штамповка и т.д.) показывает, что ультразвуковые колебания изменяют характер сил трения между поверхностью заготовки и инструмента и процесс пластического деформирования в очаге деформации.

Исследования влияния ультразвука на **процессы резания** показали, что наложение колебаний на режущий инструмент при точении, фрезеровании, развертывании и нарезании резьб позволяет повысить скорость резания и допустимую величину подачи, что в конечном итоге ведет к сокращению машинного времени. При этом уменьшается шероховатость обработанной поверхности и повышается точность.

Одним из наиболее эффективных способов **упрочнения поверхностей деталей** является поверхностное пластическое деформирование (ППД), сущность которого заключается в том, что деформирующий элемент (индентор) прижимается к поверхности обрабатываемого изделия. В результате пластической деформации поверхностного слоя увеличивается твердость, образуются сжимающие напряжения, снижается шероховатость. ППД ультразвуковым инструментом вследствие своих особенностей (высокой частоты, силы ударов) ведет к более существенному изменению микроструктуры поверхностного слоя.

Наиболее распространёнными технологиями ультразвуковой жидкостной обработки являются: **очистка и обезжиривание, интенсификация гальванических и химических процессов, приготовление эмульсий и суспензий, пропитка пористых сред, экстрагирование.**

Сравнение ультразвуковой очистки с другими методами удаления загрязнений (струйная очистка, очистка в растворах технических моющих средств, механическая очистка и др.) убедительно показывает, что ультразвуковой метод дает недостижимое другими способами качество очистки.

Получение смесей взаимно нерастворимых жидкостей (эмульсий) и взвесей и порошков в жидкости (суспензий) при наложении колебаний высокой частоты обеспечивает их стойкость и однородность.

При ультразвуковой пропитке изделий многократно сокращается время пропитки и повышается ее однородность.

Под воздействием ультразвука в гальванических и химических процессах (меднения, никелирования, хромирования, кадмирования, цинкования, серебрения и т.д.) обеспечивается повышение катодной плотности тока, ускоряется отложение покрытий. При этом достигается равномерность покрытия, с повышением его толщины в несколько раз, а также улучшение его адгезии к подложке.

Одним из путей повышения качества **лакокрасочных покрытий** является использование ультразвуковых технологий. Эффекты, возникающие в жидкости при введении в неё ультразвуковых колебаний, а также особенности ультразвукового распыления обеспечивают повышение качества и экологической безопасности проведения покрасочных работ. Исследования показали, что ультразвуковая обработка лакокрасочных материалов позволяет снизить их вязкость на 70 % и уменьшить размер пигментов, в результате чего снижается расход растворителя и повышается укрывистость, уменьшается количество наносимых слоев.

Применение технологического ультразвука не ограничивается описанными выше методами. Совершенствование существующих и создание новых технологий ультразвуковой обработки базируется на изучении динамики состояния озвучиваемого объекта и создаваемых при этом эффектах.

Перспективы развития ультразвуковых технологий

Эффекты, создаваемые ультразвуком в различных средах, не только лежат в основе технологий, рассмотренных в предыдущем разделе, но и находят применение при создании новых.

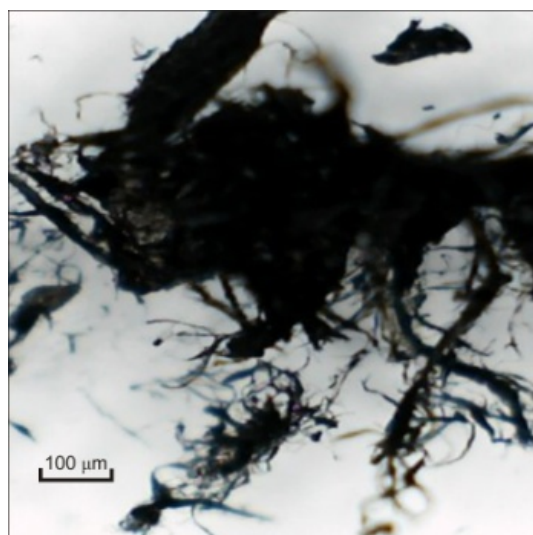
В настоящее время востребованным направлением производственных технологий является применение **углеродных наноматериалов**, в частности углеродных нанотрубок. Использование углеродных нанотрубок при производстве пластиков, резин, композитов и металлов позволяет значительно повысить механические и электрические свойства изделий из этих материалов [2].

Производство нанотрубок освоено как за рубежом, так и в России. Модификация изделий наноматериалами сопряжена с определенными трудностями. Ввиду того, что нанотруб-

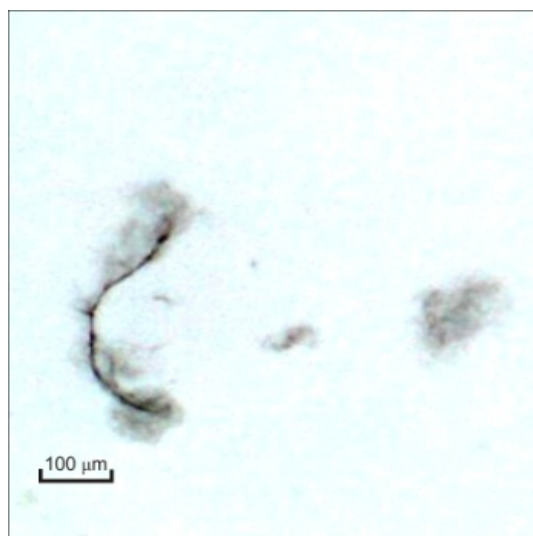
ки, объединенные силами Ван-дер-Ваальса, склонны к образованию агломератов, их введение в различные среды требует дополнительной обработки. Для активации возможностей и рационального использования нанотрубок необходимо проведение процесса дезагломерации.

Наиболее эффективным способом дезагломерации является ультразвуковой [3]. Воздействия кавитации и акустических потоков различной масштабности не только способствуют разделению агломератов на отдельные элементы, но и позволяют получить тонкие дисперсии нанотрубок в жидких средах различной вязкости.

На рис. 1 приведены результаты дезагломерации углеродных нанотрубок TUBALL в этиловом спирте при ультразвуковом воздействии.



а)



б)

Рис. 1. Углеродные нанотрубки TUBALL:
а – агломерат; б – дезагломерат

В самых разнообразных областях промышленности широкое применение получили продукты *аддитивного производства*. Это семейство технологий, которые используются для послойного изготовления физических объектов, на основе трёхмерных моделей компьютерного автоматизированного проектирования. Принцип аддитивного производства состоит в том, что изделия и их поверхности создаются с помощью послойного добавления материала – наплавления или напыления порошка, добавления жидкого полимера или композита. Аддитивные технологии являются дополнением или альтернативой традиционному субтрактивному производству, основанному на удалении первичного материала [4, 5].

Наиболее развитой и перспективной для внедрения в промышленность является технология селективного лазерного плавления (СЛП), которая основана на создании изделий из порошковых материалов за счет выборочного сплавления порошка при помощи энергии лазерного луча [6].

В связи с послойным производством изделий, полученных аддитивными технологиями, они имеют разное состояние поверхностного слоя в перпендикулярном и параллельном направлениях расплавленному слою порошка. Погрешность размеров при нанесении и плавлении каждого слоя, а также разбрызгивание части металла из пятна расплава при высоких температурах приводят к ухудшению качества поверхности на микро- и субмикроуровне. Кроме того, оксидные пленки, образующиеся на поверхности предыдущего прохода, не полностью выходят на поверхность расплавленной ванны металла и остаются внутри объема, что приводит к образованию пористости.

Таким образом, с помощью аддитивных технологий производится заготовка, которая требует дальнейшей обработки. И если внешние поверхности и отверстия с прямой осью симметрии возможно обработать традиционными способами, то для сложнопрофильных внутренних каналов и полостей, получение которых является главным преимуществом аддитивных технологий, требуется разработка новых способов обработки.

Ультразвуковая жидкостная и кавитационно-абразивная виды обработки позволяют снизить параметры шероховатости на микро- и субмикроуровнях (рис. 2), создать упрочнённый слой, характеризующийся повышенной твёрдостью. При этом обеспечивается возможность обработки сложных внутренних

каналов и полостей [7].

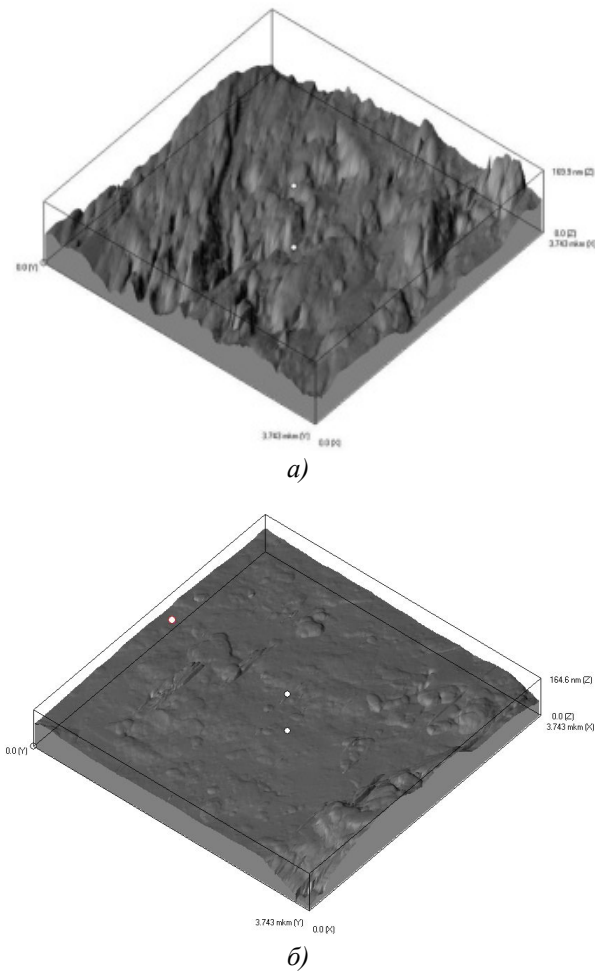


Рис. 2. Субмикропрофили поверхности образца, полученного методом селективного лазерного плавления:

a – без обработки; *б* – после ультразвуковой кавитационной обработки

Кроме селективного лазерного плавления разработаны гибридные технологии, основанные на аддитивных и субтрактивных модулях (последние чаще всего оснащены высокоскоростным фрезерным шпинделем). Изделие вначале строится по слоям, а потом передается в модуль механообработки с ЧПУ [3].

Технология ультразвукового аддитивного производства, заключается в сварке слоев металла под действием трения и давления, после которой выполняется окончательное контурное фрезерование.

Суть технологии заключается в следующем (рис. 3). Металлическую фольгу накатывают роликом с частотой вращения n , к которому при этом прикладывают нормальную силу P . Ультразвуковая колебательная система, состоящая из излучателя и волновода-

концентратора, создает перемещения с амплитудой ξ в направлении, поперечном направлению движения S ролика. В результате этого в месте контакта листов фольги разрушается оксидная пленка, возникает пластическая деформация и тепловыделение, которого достаточно для диффузионного проникновения молекул одного металла в другой. Происходит сварка слоёв фольги. Затем заготовку, сваренную из слоёв фольги, обрабатывают фрезерованием, удаляя лишний металл.

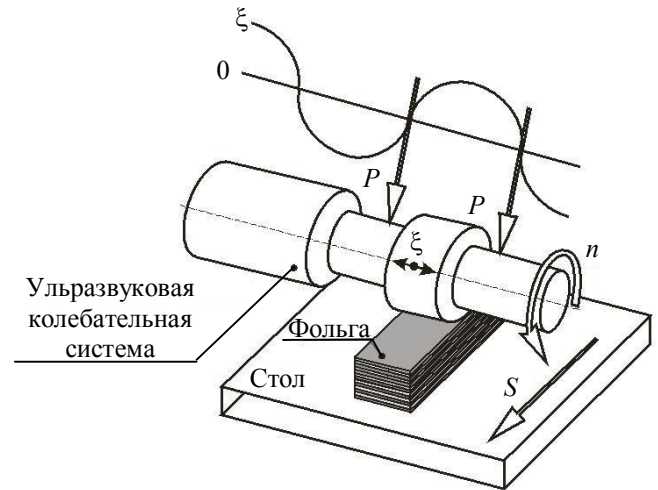


Рис. 3. Схема ультразвуковой аддитивной обработки:

P – сила нормального давления; S – продольная подача инструмента; n – частота вращения инструмента; ξ – амплитуда колебаний инструмента

Основными преимуществами технологии являются возможность получения композитных изделий сложной формы из разнородных материалов, таких как сталь, титан, медь и т.д.

Заключение

Широкое использование высокоэффективных, экологически безопасных ультразвуковых технологий в настоящее время обеспечивает повышение надежности и долговечности изделий машиностроения, узлов и деталей машин.

Перспективные направления использования ультразвука представляют собой практическую реализацию изобретений, открывающих принципиально новые направления в технике и технологии машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приходько, В.М. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / под общ. ред. О.В. Абрамова и В.М. Приходько. М.: Янус-К, 2006. – 688 с.

2. **Углеродные** нанотрубки [Электронный ресурс]. URL: http://www.newchemistry.ru/printletter.phpn_id=.644.
3. **Голованов, Е.В., Блохин, А.Н.** Определение оптимальных режимных параметров процесса ультразвукового диспергирования углеродных нанотрубок в эпоксидном связующем // *Современные научные исследования и инновации*. 2013. № 7 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2013/07/25361>.
4. **Трубашевский Д., Ежеленко В.** Эра аддитивного производства наступает // САПР и графика. – 2015. – № 7. – С. 62–65.
5. **Григорьев, С.Н., Смуров, И.Ю.** Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // *Инновации*. – 2013. – № 10. – С. 76–82.
6. **Каблов, Е.Н.** Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 7–17.
7. **Конов, С.Г., Котобан, Д.В., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С.** Перспективы применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2015. – № 9(51). – С. 28–34.

REFERENCES

1. Prikhodko, V.M. *High-power Ultrasound in Metallurgy and Mechanical Engineering* / under the general editorship of

- O.V. Abramov and V.M. Prikhodko. M.: Janus-K, 2006. pp. 688.
2. Carbonic Nano-Tubes [Electronic Resource]. URL: http://www.newchemistry.ru/printletter.phpn_id=.644.
3. Golovanov, E.V., Blokhin, A.N. Optimum mode parameter definition for ultrasonic dispersion processes of carbonic nano-tubes in epoxy coupler // *Modern Scientific Investigations and Innovations*. 2013. № 7 [Electronic Resource]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2013/07/25361>.
4. Trubashevsky D., Yezhelenko V. Additive production era arrives // *CAD and Graphics*. 2015. № 7. pp. 62–65.
5. Grigoriev, S.N., Smurov, I.Yu. Outlooks in innovation additive production development in Russia and abroad // *Innovations*. – 2013. – № 10. – pp. 76–82.
6. Kablov, E.N. Strategic directions in development of materials and techniques of their processing up to 2030 // *Aircraft Materials and Techniques*. – 2012. – № 5. – pp. 7–17.
7. Konov, S.G., Kotoban, D.V., Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S. Outlooks in application of ultrasonic techniques in additive production // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 9(51). – pp. 28–34.

Рецензент д.т.н. А.А. Ситников

УДК 621.001.4
DOI: 10.12737/20816

А.О. Горленко, д.т.н.
(Брянский государственный технический университет)
E-mail: bugi12@bk.ru

Повышение износостойкости поверхностей трения сферических подшипников скольжения финишным плазменным упрочнением

Рассмотрена технология финишного плазменного упрочнения с нанесением многослойного нанопокрывтия системы Si–O–C–N применительно к упрочнению поверхностей трения сферических подшипников скольжения. Исследованы трибологические характеристики наносимого износостойкого антифрикционного покрытия, которые обуславливают повышение износостойкости сферических подшипников скольжения.

Ключевые слова: износостойкость; многослойное антифрикционное покрытие; поверхность трения; сферический подшипник скольжения; плазменное упрочнение.