

УДК 621.9.048.6

DOI:10.30987/2223-4608-2020-9-21-26

В.М. Приходько, чл.–кор. РАН, **Р.И. Нигметзянов**, к.т.н.,
Д.С. Симонов, аспирант, **С.К. Сундуков**, к.т.н., **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

Ультразвук в комбинированных технологиях машиностроения*

Приведён обзор технологий с использованием ультразвука не только успешно применяемых в настоящее время, но и ряда вновь разрабатываемых процессов. Их высокая эффективность обеспечивается комбинированием известных методов с ультразвуковым воздействием. При этом не только суммируются позитивные проявления каждого из процессов, но и усиливается синергетический эффект от их совмещения.

Ключевые слова: ультразвуковая технология; машиностроение; обработка материалов; поверхностное деформирование; акустические потоки; кавитация.

V.M. Prikhodko, corresponding member of the RAS, **R.I. Nigmatzyanov**, Can. Sc. Tech.,
D.S. Simonov, Post graduate student, **S.K. Sundukov**, Can. Sc. Tech., **D.S. Fatyukhin**, Dr. Sc. Tech.
(Moscow Automobile-Road State Technical University (MADI), 64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319)

Ultrasound in combined technologies of mechanical engineering

A review of technologies with the use of ultrasound not only used successfully at present, but a number of processes under development is carried out. Their high productivity is provided with the combination of the known methods with ultrasound impact. At that there are summarized not only positive phenomena of each of the processes, but a synergetic effect becomes stronger due to their integration.

Keywords: ultrasonic technology; mechanical engineering; material processing; surface deformation; acoustic flows; cavitation.

Введение

Технологическое воздействие, создаваемое ультразвуком в твердых, жидких и газообразных средах, обеспечивает эффекты, которые позволяют снизить себестоимость процесса или продукта, получать новые продукты или повысить качество существующих, совершенствовать традиционные технологические процессы, снижать негативное воздействие при меняемых технологий на окружающую

* Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FSFM-2020-0011 (2019-1342). Экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ.

среду [1]. Использование ультразвуковых колебаний для интенсификации производственных процессов нашло широкое промышленное применение в различных отраслях: машиностроении, энергетике, пищевой, медицинской и др. [2].

Механизмы изменения свойств твердых, жидких и газообразных сред при передаче им высокочастотных колебаний отличаются по своей физической природе. При обработке твердых тел наиболее значимыми являются эффекты снижения трения и увеличение пластичности материалов, а также релаксация остаточных напряжений в поверхностном слое обработанных заготовок. Основными механизмами, определяющими результат воздей-

ствия ультразвука в жидкостях и дисперсных системах, являются ультразвуковая кавитация и акустические потоки.

Перечисленные факторы позволяют успешно применять ультразвук для интенсификации методов получения и обработки самых различных материалов.

Комбинированные технологии обработки твердых тел

При обработке материалов резанием работа затрачивается на пластическую деформацию срезаемого слоя и на трение рабочих поверхностей инструмента о стружку и заготовку. При наложении ультразвуковых колебаний на режущий инструмент уменьшается сила резания, что приводит к повышению качества обрабатываемых поверхностей.

Интенсификация процессов механической обработки (точение, фрезерование, сверление и др.) основана на снижении трения передней и задней поверхностей режущего инструмента, ускорении движения и образовании дислокаций.

Деформация материала при резании колеблющимся инструментом характеризуется уменьшением силы резания до 30 ... 40 %, изменением процесса стружкообразования и контактных температур в зоне резания. В результате значительно повышается качество обрабатываемых поверхностей, в 1,5 – 2 раза возрастает стойкость инструмента, производительность обработки повышается в 2 – 3 раза.

Наблюдаемые эффекты зависят от свойств обрабатываемого материала: чем выше пластичность обрабатываемого материала, тем значительнее это воздействие. Наибольшее применение получило наложение на инструмент ультразвуковых колебаний при обработке титановых и алюминиевых сплавов, вместе с тем ультразвук успешно используется для размерной обработки заготовок из труднообрабатываемых (в том числе композиционных) материалов [3].

Для обеспечения новых технологических возможностей современной техники требуются технологии обработки труднообрабатываемых хрупких, твердых и сверхтвердых материалов, таких как керамика, кварц, рубин, алмаз, стекло, твердые сплавы. Формообразование деталей из таких материалов возможно с применением ультразвуковой размерной обработки.

Физика процесса формообразования с по-

мощью ультразвука заключается в механическом разрушении поверхности обрабатываемой заготовки абразивными материалами. Инструмент сообщает абразиву колебания с ультразвуковой частотой (8 ... 40 кГц) и прижимает его к поверхности с заданной силой F . Действие частичек абразива приводит к разрушению материала в виде микросколов, поэтому эффективно поддаются этому способу обработки только хрупкие материалы. При оптимальных условиях наибольшая скорость съема достигается при обработке стекла и составляет 6000...9000 мм³/мин, при обработке твердого сплава – около 100...150 мм³/мин [4].

Технологические возможности в основном определяются фракцией абразивного зерна и физико-механическими свойствами обрабатываемого материала. Чем меньше обрабатываемый материал проявляет пластические свойства, тем больше шероховатость поверхности. Так, для стекла параметр шероховатости Ra лежит в интервале от 2,5 до 5,0 мкм, а для твердых сплавов Ra – от 0,32 до 0,63 мкм [4].

Снижение трения на границе «инструмент – заготовка» и уменьшение сопротивления пластическому деформированию под действием ультразвука являются наиболее значимыми при обработке материалов давлением (ОМД). Значительное снижение статического предела текучести и изменение пластичности при деформации с воздействием ультразвуковых колебаний связаны как с действием знакопеременных динамических напряжений, так и с поглощением акустической энергии дефектами кристаллического строения деформируемого металла.

Повышение энергоэффективности процессов ОМД (волочения, прессования, штамповки) достижимо при использовании совмещенных технологических процессов. Применение ультразвука при правильном выборе типа колебаний и расположения источника колебаний, когда очаг деформаций располагается в пучности колебательной скорости, позволяет максимально изменить силу трения. В этом случае наблюдается максимальная скорость пластической деформации.

Теми же факторами определяется и эффективность ультразвукового *поверхностного пластического деформирования (ППД)*. Применение методов ультразвукового поверхностного пластического деформирования позволяет формировать структуру, повышать микротвёрдость поверхностного слоя, снижать шероховатость, изменять знак и уровень остаточных напряжений, что влияет также на три-

биологические свойства объектов обработки. Отличительной характеристикой материала, полученного в результате ультразвукового деформирования, является заметное измельчение зерен и сложный характер деформации (изгиб-кручение) кристаллической решетки. В результате обработки наблюдается также измельчение частиц вторых фаз, средние размеры которых составляют 0,1...0,3 мкм. В результате структурно-фазовых превращений повышается прочность, твердость и коррозионная стойкость материала.

При высокой частоте и сравнительно небольшой силе удара индентора, находящегося с излучателем в связанном состоянии (при ультразвуковом выглаживании) наблюдается значительное снижение высотных параметров шероховатости поверхности до 2 – 4 раз. При этом воздействие деформации ультразвуковых колебаний распространяется на глубину 50...150 мкм.

В случае виброударной ультразвуковой обработки (индентор находится в свободном состоянии) уменьшение высотных и шаговых параметров профиля не столь значительно, но при этом глубина деформированного слоя в этом случае возрастает до 250...300 мкм.

Комбинация перечисленных методов позволяет обеспечить снижение шероховатости поверхности и, при этом, значительную глубину и твердость деформированного слоя, что приводит к повышению износостойкости (рис.1).

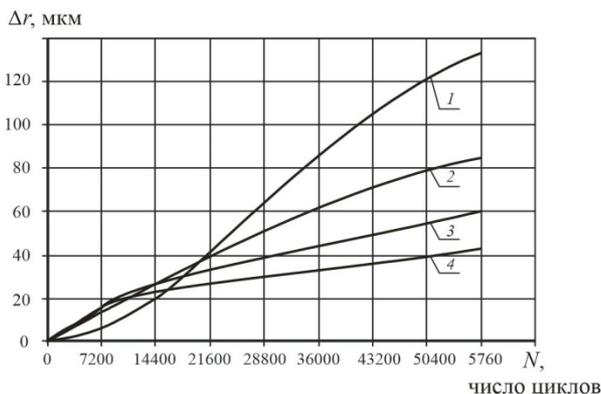


Рис. 1. Зависимости размерного износа Δr образцов из стали 45:

1 – без обработки; 2 – после выглаживания; 3 – после виброударной обработки; 4 – после виброударной обработки и последующего выглаживания

Перспективным направлением является комбинирование принципиально различных процессов – химико-термической обработки и

ультразвукового упрочнения. Применение такого комбинированного метода позволяет получить качественно новые результаты по изменению физико-механических и эксплуатационных свойств изделий.

Анализ полученных результатов показывает, что применение ультразвукового ППД после термообработки ТВЧ позволяет увеличить микротвёрдость поверхностного слоя до 1,5 – 1,6 раз.

Одним из способов химико-термической обработки является азотирование. При всех достоинствах этого способа по модифицированию поверхности сплавов есть существенный недостаток – большое время процесса. Связано это с малой скоростью диффундирования атомов азота в дислокации кристаллической решетки сплава. Наложение ультразвуковых колебаний позволяет сократить время азотирования в 2 раза.

Измерения профиля твердости образцов стали Ст3 без обработки, после азотирования, после ультразвукового ППД, а также после азотирования с последующим ультразвуковым ППД позволили получить зависимости, представленные на рис. 2.

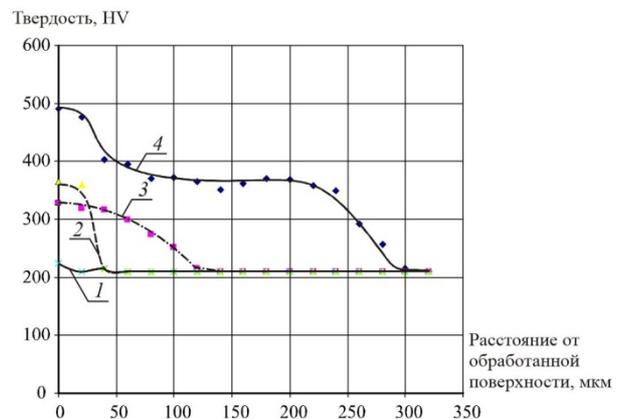


Рис. 2. Твёрдость образцов из стали Ст3:

1 – без обработки; 2 – после азотирования; 3 – после ультразвукового ППД; 4 – после азотирования с последующим ультразвуковым ППД

Полученные результаты показывают, что комплексное ультразвуковое воздействие и азотирование повышает микротвёрдость поверхности материалов в 2 – 2,5 раз, при этом упрочнение распространяется на толщину слоя до 2 раз превышающую полученную азотированием. Профиль микротвёрдости образца, полученного последовательной ультразвуковой обработкой после азотирования, характеризуется плавным изменением свойств ме-

жду слоями; резкие перепады микротвёрдости, являющиеся слабым местом изделия (см. график 2, рис. 2) при обычном азотировании, отсутствуют.

Перечисленные выше механизмы ультразвукового воздействия (уменьшение трения и сопротивления пластическому деформированию) лежат в основе *процессов сборки и разборки соединений деталей*.

Изменение характера трения на квазивязкое за счет быстрых вибраций пар деталей, подвергаемых сборки или разборки, позволяет в значительной мере ускорить сборочно-разборочные операции, при этом обеспечить сохранность деталей [1]. Экспериментальные исследования показали, что наложение ультразвуковых колебаний на резьбовое соединение в процессе сборки позволяет до 30 – 35 % повысить значение момента предварительного закручивания.

Учитывая, что момент закручивания резьбы пропорционален осевому усилию и трению скольжения, приведённые результаты позволяют сделать следующие практические выводы. Во-первых, для достижения требуемого осевого усилия наложение ультразвуковых колебаний позволяет значительно уменьшить момент закручивания. Во-вторых, уменьшение трения способствует снижению начального осевого напряжения в сплошном теле болта.

Наложение колебаний на элементы резьбового соединения в процессе разборки способствует значительному снижению воздействия интенсивных динамических нагрузок на них, что позволяет избежать деформации и разрушения поверхностей деталей.

Исследования по сборке прессовых соединений под действием ультразвуковых колебаний показали, что наложение колебаний позволяет значительно повысить эффективность сборки за счёт возможности передачи значительных ускорений и эффекта преобразования сухого трения в квазивязкое.

Результаты проведённых исследований показывают, что широкий спектр режимов ультразвуковой обработки обеспечивает снижение коэффициента трения при запрессовке. При увеличении натяга соединения и амплитуды колебаний влияние изменения коэффициента трения на процесс сборки возрастает.

Ультразвуковую сборку прессовых соединений можно применять как отдельный процесс, так и для интенсификации других методов сборки:

- наложение колебаний на охватываемую

деталь для снижения усилия прессы при механической сборке;

- наложение колебаний на запрессовываемую деталь при гидропрессовой сборке для снижения давления нагнетания масла в зону сборки за счёт звукокапиллярного эффекта, а также производить ультразвуковую запрессовку при наличии гидравлической силы, что дополнительно снижает коэффициент трения;

- использование колебаний в сборке методом температурных деформаций позволит снизить величину требуемого зазора и требуемую температуру нагрева.

Применение ультразвука в процессе получения заклёпочных соединений позволяет получить равномерное распределение остаточных сжимающих напряжений по всей толщине соединяемого пакета при одновременном снижении усилия, необходимого для образования соединения [2].

Проведённые испытания на срез показали, что при ультразвуковом ударном способе клёпки напряжение на срез соединения увеличивается на 12...13 %. Кроме изменения напряжения отмечено заметное уменьшение взаимного смещения элементов соединения до разрушения. Поскольку заклёпка начинает работать на срез только после сдвига сопрягаемых деталей на величину радиального зазора между стержнем заклёпки и стенками отверстия, уменьшение перемещения при ультразвуковом способе показывает большее заполнение отверстия материалом заклёпки. Снижение усилия, необходимого для образования заклёпочного соединения, позволяет применять заклёпку для соединения материалов, обладающих разной прочностью (например, соединения оргстекла и стали).

Ещё одним перспективным направлением применения ультразвука является диффузионная сварка. Ультразвуковая сварка металлов позволяет получить соединение металлов в твердой фазе (без плавления) под действием тангенциальных колебаний и нормальных усилий. Ультразвуковая сварка, по сравнению с электросваркой, позволяет приваривать тонкие проволоку и фольгу к массивным деталям, сваривать разнородные металлы.

Наиболее динамично развивающимся направлением производственных технологий являются аддитивные. Использование ультразвука в аддитивных технологиях основано на взаимной диффузии соединяемых слоев материала. Основными преимуществами комбинированной технологии является возможность получения композитных изделий сложной

формы из разнородных материалов, таких как сталь, титан, медь и др. [5].

Основным методом соединения термопластических полимеров является сварка. Она может быть осуществлена путем передачи тепла от внешнего источника или преобразования в тепловую энергию, вводимой в зону соединения. Ультразвуковая сварка полимеров связана с локальным выделением тепла на границе контакта и передачи тепла за счет потерь в материале инструмента. В отличие от сварки металлов сварка пластмасс осуществляется инструментом, колеблющимся нормально к поверхности.

Прочность соединения и отсутствие прожогов позволяет широко использовать ультразвук для сварки полиэтиленовой пленки, сварки трикотажно-лавсанового полотна, полихлорвиниловой пленки толщиной до 0,2 мм. Большая часть этих операций производится путем непрерывного перемещения изделия относительно инструмента.

Комбинированные технологии обработки жидкостей и дисперсных систем

Основное влияние на свойства обрабатываемой жидкости оказывают эффекты механической природы: кавитация, переменное звуковое давление, радиационное давление и акустические потоки. Эти эффекты вызывают такие процессы как нагрев, перемешивание, диспергирование, коагуляция, окисление, ускорение химических реакций и ряд других.

Рациональное использование данных эффектов позволяет интенсифицировать процессы в жидких средах, применяемых в различных областях промышленности.

Наиболее исследованным и распространённым ультразвуковым технологическим процессом является очистка. Ультразвуковая очистка нашла применение как при производстве изделий машиностроения, так и при их обслуживании и ремонте. Основными преимуществами ультразвуковой очистки являются высокая эффективность, экологическая безопасность, а также возможность автоматизации процесса.

Существенно расширить область использования ультразвуковой очистки позволило применение высокоамплитудных режимов обработки. Выявлено, что при введении в жидкость колебаний с амплитудой излучателя более 12...15 мкм качественно меняется воздействие на обрабатываемые изделия. Благодаря образованию технологических зон, различных

по интенсивности излучения и характеру физических процессов, не только удается повысить эффективность обработки, но и избежать риска кавитационных повреждений объектов обработки [1].

В свою очередь работа, которую совершает кавитация, может использоваться для формирования специфических свойств и строения поверхностных слоев материалов. При кавитационно-эрозионной обработке возрастает микротвердость, изменяется шероховатость и субшероховатость (рис. 3).



Рис. 3. Структура материала после кавитационной обработки

Схожим по воздействию с очисткой является процесс кавитационно-абразивной обработки. Добавление абразивных зёрен в озвучиваемую жидкость создаёт условия для уменьшения микронеровностей на внутренних и внешних поверхностях деталей. Так, например, применение кавитационно-абразивной обработки в аддитивной технологии после селективного лазерного плавления позволяет снизить шероховатость сложнопрофильных поверхностей получаемых изделий [2].

Ультразвуковое эмульгирование обладает широкими технологическими возможностями для получения эмульсий различного состава. Ультразвук позволяет получить эмульсии с размерами частиц 1...5 мкм. Эмульсии со столь малым размером частиц являются устойчивыми и не расслаиваются в течение нескольких часов.

Получение эмульсионных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) происходит при смешивании эмульсола и воды. Важной особенностью при эмульгировании исследуемой СОЖ является значительная разница вязкости между смешиваемыми жидкостями. Вязкость эмульсола выше воды в 50 – 75 раз, что приводит к определённым трудностям. Применение ультразвуковых колебаний для приготовления СОЖ позволяет на порядок

снизить время перемешивания компонентов, а также добиться высокой стойкости эмульсии.

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) представляют собой суспензию пигментов в растворе плёнкообразующего полимера.

Как и многие растворы полимеров, ЛКМ обладают аномальной вязкостью, которая обусловлена структурообразованием, т.е. процессом агрегирования частиц растворов, сопровождающимся образованием пространственных легко разрушаемых структур. В процессе структурообразования растворенные частицы образуют сложные структуры, в петлях которых оказывается иммобилизованная часть растворителя, что приводит к повышению вязкости.

С увеличением внешнего давления на растворы полимеров образованные структуры разрушаются, в результате чего растворитель освобождается и вязкость уменьшается. Создание ультразвуковой технологии обработки лакокрасочных материалов позволило осуществлять равномерное перемешивание компонентов по всему объёму; снизить вязкость, уменьшить расход растворителя; понизить степень перетира, повысить укрывистость и улучшить цветораспределение лакокрасочного покрытия [2].

Кроме того, ультразвуковая обработка нашла применение при нанесении лакокрасочных материалов на окрашиваемую поверхность. Интенсификация пневматического распыления аэрозолей с помощью ультразвука обеспечивает возможность однослойного нанесения ЛКМ, снижения давления в пневмосистеме в 4 раза, повысить коэффициент массопереноса ЛКМ и снизить потери на туманообразование, значительно повысить адгезию покрытия за счёт снижения давления.

Использование углеродных нанотрубок при производстве пластиков, резин, композитов и металлов позволяет значительно повысить механические и электрические свойства изделий из этих материалов. Модификация изделий наноматериалами сопряжена с определёнными трудностями. Ввиду того, что нанотрубки, объединённые 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. Воздействие ультразвуковой кавитации и акустических потоков различного масштаба не только способствуют разделению агломератов на отдельные элементы, но и по-

зволяют получить тонкие дисперсии нанотрубок в жидких средах различной вязкости.

Заключение

Приведён обзор технологий с использованием ультразвука не только успешно применяемых в настоящее время, но и ряда новых технологических процессов; их высокая эффективность обеспечивается комбинированием известных методов с ультразвуковым воздействием, при этом не только суммируются позитивные проявления каждого из процессов, но и усиливается синергетический эффект от их совмещения. Возможности управления свойствами объектов обработки на микро- и субмикроруровне создают предпосылки для использования ультразвука в таких направлениях технологии как нанотехнологии и аддитивное производство.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приходько, В.М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте транспортной техники. – М.: Изд. Техполиграфцентр, 2003. – 253 с.
2. Приходько, В.М., Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С. Инновационные технологические процессы с использованием ультразвука // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 7 (73). – С. 11-14.
3. Суслов, А.Г. Справочник технолога. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
4. Казанцев, В.Ф. Физические основы технологического применения ультразвука: учебное пособие. – М.: МАДИ (ГТУ), 2008. – 102с.
5. Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С., Гриб, В.В., Карцов, С.К. Пути совершенствования аддитивных технологий с помощью ультразвука // СТИИ. – 2017. – № 7. – С. 2-6.

REFERENCES

1. Prikhodko, V.M. *Ultrasonic Technologies at Manufacturing, Operation and Repair of Transport Equipment*. – М.: Techpolygraphcenter, 2003. – pp. 253.
2. Prikhodko, V.M., Nigmatzyanov, R.I., Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S. Innovation engineering processes with ultrasound use // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.7 (73). – pp. 11-14.
3. Suslov, A.G. *Technologist's reference book*. – М.: *Innovation Mechanical Engineering*, 2019. – pp. 800.
4. Kazantsev, V.F. *Physical Fundamentals of Ultrasound Technological Use: manual*. – М.: MADI (STU), 2008. – pp. 102.
5. Nigmatzyanov, R.I., Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S., Grib, V.V., Kartsov, S.K. *Ways for Additive Technologies Improvement with Ultrasound Use* // STIN. – 2017. – No.7. – pp. 2-6.

Рецензент д.т.н. Л.Г. Петрова