

УДК 621.9.048.6

DOI: 10.30987/article\_5cf7bd2f98e797.67795796

В.М. Приходько, член-кор. РАН,

Р.И. Нигметзянов, к.т.н.,

С.К. Сундуков, к.т.н.,

Д.С. Фатюхин, д.т.н.

(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
129090, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64)

E-mail: mitriy2@yandex.ru

## Технологические возможности применения ультразвука для повышения эксплуатационных свойств изделий транспортного машиностроения

*Теоретические и экспериментальные исследования позволили выявить основные акустико-технологические параметры, определяющие эффективность ультразвуковой обработки деталей, узлов и агрегатов автотранспортной техники в условиях производства, ремонта и эксплуатации. Проведенный анализ энергетических особенностей введения ультразвука в жидко- и твердофазную технологические среды позволил сформулировать принципы организации ультразвуковых технологических процессов, разработать методологию построения ультразвукового оборудования технологического назначения, оценить эффективность их работы. На единой научной и материальной основах разработано ультразвуковое оборудование нового поколения для получения и обработки деталей и узлов транспортного машиностроения с целью повышения их надежности и долговечности.*

**Ключевые слова:** ультразвук; машиностроение; кавитация; поверхностное деформирование.

V.M. Prikhod'ko, Corr. Member of RAS,

R.I. Nigmatzyanov, Can. Sc. Tech.,

S.K. Sundukov, Can. Sc. Tech.,

D.S. Fatyukhin, Dr. Sc. Tech.

(Moscow Road State Technical Institute (MADI), 64, Leningradsky Avenue, Moscow, 129090)

## Technological potentialities in ultrasound use for operation properties increase in parts of transport engineering

*Theoretical and experimental investigations allowed revealing basic acoustic-technological parameters defining the effectiveness in ultrasonic processing parts, units and assemblies of motor engineering under conditions of production, repair and operation. The analysis carried out of energy peculiarities in ultrasound application in liquid- and solid phase technological environment allowed formulating the organization principles of ultrasonic technological processes, developing a methodology for the formation of ultrasonic equipment for a technological purpose, estimating their working effectiveness. On a single scientific and material basis there is developed ultrasonic equipment of a new generation for manufacturing and processing parts and units of motor engineering with the purpose of their reliability and life increase.*

**Keywords:** ultrasound; mechanical engineering; cavitation; surface deformation.

### Введение

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. Одними из самых востребованных являются технологии, обеспечивающие требуемое воздействие на объект обра-

ботки на микро- и субмикроуровне.

Использование технологий, масштабы воздействия которых соизмеримы с размерами кристаллических решеток и даже элементарных частиц, на современном этапе развития транспортного машиностроения является чрезвычайно актуальным. Одним из технологических направлений формирования свойств изделий на подобном уровне является использование электрофизикохимических методов обработки, среди которых достойное место

занимают ультразвуковые технологии, позволяющие формировать совокупность требуемых эксплуатационных свойств изделий.

Методы ультразвуковой обработки, основанные на высокочастотном поверхностном пластическом деформировании, кавитационном, кавитационно-эрозионном, кавитационно-абразивном воздействии позволяют управлять наиболее значимыми свойствами поверхностного слоя конструкционных материалов, включая чистоту и отсутствие загрязнений, что, в свою очередь, приводит к формированию их оптимальных эксплуатационных характеристик [1].

Применение высокочастотных колебаний при сборке и разборке сопряжений деталей и узлов техники позволяет значительно уменьшить нагрузки при сборке, снизить риск повреждения деталей при разборке, а также повысить качество изделий [2].

Ультразвук представляет собой экологически чистое средство воздействия на материал, при этом не связанное с потреблением специфических расходуемых реагентов. Использование ультразвука в технологических процессах получения и обработки материалов и веществ позволяет снизить себестоимость процесса или продукта, получать новые продукты или повысить качество существующих, интенсифицировать традиционные технологические процессы, уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Несмотря на достигнутые результаты в разработке ультразвуковых технологий и оборудования, в настоящее время является актуальным их модернизация и автоматизация, а также разработка новых технологических процессов, их оптимизация и создание высокоэффективного ультразвукового оборудования.

### Формирование свойств поверхностного слоя конструкционных материалов

Основой повышения эксплуатационных свойств изделий является формирование требуемых свойств поверхностного слоя. Уменьшение трения и износа, повышение коррозионной и усталостной прочности, и, как следствие, повышение надежности и ресурса – свойства, напрямую зависящие от структуры, твердости, внутренних остаточных напряжений, шероховатости и субшероховатости [3 – 4].

Проблема долговечности может решаться не только повышением легирующих элементов в материале деталей, но и технологиче-

скими методами, обеспечивающими направленное изменение физико-механических и других свойств поверхностного слоя деталей при наименьших материальных и энергетических затратах [5].

Наиболее распространенными методами улучшения эксплуатационных свойств машин являются отделочно-упрочняющие методы поверхностного пластического деформирования (ППД) [6].

От обычного выглаживания метод ППД ультразвуковым инструментом отличается тем, что инструмент совершает колебания с ультразвуковой частотой. Амплитуда колебаний поляризована в плоскости, перпендикулярной обрабатываемой поверхности детали. В процессе обработки инструмент прижимается к обрабатываемой поверхности с постоянной силой и, как при обычном выглаживании, перемещается по поверхности детали.

Инструмент для ППД представляет собой ультразвуковую колебательную систему, состоящую из преобразователя и волновода-концентратора, к торцу которого присоединяется деформирующий элемент (индентор).

Экспериментальные исследования показали, что в процессе обработки между деформирующим элементом и обрабатываемой поверхностью возникает периодический контакт с частотой ультразвуковых колебаний. В момент контакта мгновенные напряжения существенно выше средних, что вызывает значительную пластическую деформацию. Также как и для других методов поверхностного деформирования (выглаживание, обкатывание, дорнование и др.) в результате обработки уменьшается шероховатость поверхности.

Высотные параметры шероховатости поверхности уменьшаются с увеличением амплитуды колебаний или усилия прижима. Так, например, для стали 12X18H9T при исходном значении  $Ra = 25$  мкм после ультразвукового упрочнения шероховатость составила 0,4 мкм. Одновременно в результате пластического деформирования увеличивается плотность дислокаций. В недеформированных металлах средняя плотность дислокаций составляет  $10^6 \dots 10^8$  см<sup>-2</sup>. После обкатки роликом количество дислокаций увеличивается до  $6 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>, а при ультразвуковой поверхностной обработке оно возрастает до  $3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. С увеличением плотности дислокаций растет и твердость.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили установить механизм пластического деформирования при упрочняющей ультразвуковой обработке и связь

степени упрочнения с основными параметрами режима, к которым относятся амплитуда  $\xi_m$  и усилие прижима  $F_n$ , радиус кривизны индентора и др.

Характерным для упрочняющей ультразвуковой обработки, равно как и для любого вида обработки поверхностным пластическим деформированием, является создание сжимающих напряжений. Полученные данные [7] показывают, что ультразвуковая обработка создает или значительно увеличивает остаточные напряжения как в продольном, так и в поперечном направлениях. Это является благоприятным фактором, так как препятствует зарождению и развитию трещин.

Пластическая деформация поверхности, снижение шероховатости, появление сжимающих остаточных напряжений приводят к увеличению износостойкости материала. Оценка износостойкости образцов из стали 45 на машине трения по схеме «вал – втулка» показала, что упрочняющая ультразвуковая обработка почти в 2 раза повышает износостойкость образцов.

#### **Обеспечение промышленной чистоты деталей и узлов техники**

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. При этом сокращаются затраты времени на процесс, появляется возможность замены ручного труда и исключения из технологического процесса пожароопасных и токсичных растворителей. Все это определило широкое применение ультразвуковой очистки в различных отраслях промышленности и транспорта в условиях производства, эксплуатации и ремонта.

Основными эффектами, определяющими механизм процесса ультразвуковой очистки, являются кавитация и акустические течения. Решающее значение при очистке от загрязнений играет кавитация, сопровождающаяся захлопыванием кавитационных пузырьков и образованием интенсивных ударных (кумулятивных) воздействий. Захлопывание кавитационного пузырька влечет за собой механическое разрушение (эрозию) близлежащих твердых поверхностей.

Эрозионная активность кавитационных пузырьков значительно меняется с увеличением

мощности, вводимой в озвучиваемый объем [8]. Пульсирующие незахлопывающиеся пузырьки, так же как и захлопывающиеся кавитационные пузырьки, оказывают разрушающее действие на различные пленки загрязнений, представляющие собой поверхности раздела жидкости и твердого тела. В результате проведенных исследований выяснен механизм разрушения пленок загрязнения пульсирующими пузырьками – это отслоение и эмульгирование.

К основным факторам, определяющим технологические характеристики процесса ультразвуковой очистки, относятся: амплитуда смещения излучателя; удельная акустическая мощность; концентрация компонентов моющего вещества в растворе; температура моющего раствора; размеры, форма очищаемых деталей и их расположение относительно излучателя, а также вид загрязнения.

Одним из направлений работ по повышению эффективности ультразвуковой очистки стало создание излучателей с развитой излучающей поверхностью. Основу другого направления заложили результаты основополагающих исследований кавитации и акустических течений в жидкости при излучении с амплитудой колебаний существенно превышающих порог кавитации.

Способ высокоамплитудной ультразвуковой очистки существенно расширил возможности как эрозионного, так и безэрозионного механизмов удаления загрязнения (очистки), обеспечив высокую устойчивость избранного режима обработки при сохранении возможности использования практически всего разнообразия идей и приемов управления свойствами моющих сред. Этот способ выгодно отличается от других тем, что очистка ведется в водном растворе с небольшими добавками ПАВ. Растворы удовлетворяют экологическим требованиям и безопасны, поскольку биологически разрушаемы.

Выбор режима, при котором можно минимизировать кавитационные разрушения положительно отличает его от других способов очистки. Характерным отличием этого режима является то, что процесс очистки ведется при амплитуде колебательных смещений торца плоского излучателя 12...15 мкм существенно превышающих порог кавитации (в диапазоне частот 20...25 кГц).

Результаты кинематографического исследования и определение эрозионной активности с помощью тест-объектов из фольги и по уменьшению веса образцов позволили развить

и существенно дополнить предложенную ранее модель кавитационной области. Непосредственно под излучателем образуется зона «интенсивной кавитации». В этой зоне кавитационная эрозия весьма значительна и резко возрастает с увеличением амплитуды. Интенсивная кавитация приводит к образованию мощного гидродинамического потока, насыщенного большим количеством кавитационных пузырьков [9].

Теоретически и экспериментально были изучены характер распределения плотности акустической энергии, поля скоростей и конфигурация акустических потоков, механизм стабилизации режима при высокоамплитудной очистке. Широта технологических возможностей, открываемых особенностями ультразвуковой высокоамплитудной обработки, позволила установить ранее ненаблюдаемые физические эффекты, в частности:

- стабилизацию работы колебательной системы при работе в жидкости;
- низкочастотные пульсации кавитационной области;
- изменение уровня кавитационного воздействия при относительном перемещении излучателей и объектов обработки;
- управление кавитацией подачей технологической жидкости в зону обработки.

Проведенные исследования создали научную базу применения этой технологии при очистке деталей при производстве и ремонте транспортных изделий.

Исследования динамики процесса ультразвуковой очистки деталей показали, что для эксплуатационных загрязнений связь степени очистки  $\gamma$  с длительностью  $\tau$  описывается уравнением

$$\gamma = 100 \cdot \left(1 - e^{-2K\tau^{0,5}}\right),$$

где  $K$  – величина, зависящая от параметров режима очистки и, в первую очередь, от амплитуды колебательных смещений на поверхности излучателя.

Детальные исследования процесса очистки позволили установить характер изменения величины  $K$  с увеличением амплитуды колебаний  $\xi_m$ .

Известно, что амплитуда смещения однозначно определяет величину акустической мощности, вводимой в озвучиваемый объем технологической жидкости. Экспериментально установленная связь между  $W_{уд}$  и  $\xi_m$  позволяет определять оптимальные значения удельной акустической мощности. При очистке деталей в органических растворителях зна-

чения  $W_{уд}$  должны составлять 0,5...2 Вт/см<sup>2</sup>, тогда, как в растворах на неорганической основе значения  $W_{уд}$  должны быть в несколько раз выше (8...10 и более Вт/см<sup>2</sup>).

Полученные оптимальные значения амплитуд смещения и соответствующие им значения  $W_{уд}$  определяются характером загрязнения и конструктивными особенностями очищаемых деталей.

В качестве моющей среды при ультразвуковой очистке, как правило, используется раствор, способный оказывать физико-химическое воздействие на загрязнение. Для повышения скорости и качества очистки целесообразно сочетать высокую физико-химическую активность технологической жидкости с максимальным проявлением в ней тех эффектов ультразвукового поля, которые влияют на процесс очистки деталей от данного вида загрязнений. Однако это не всегда удается. Физические свойства химически активной жидкости в ряде случаев могут быть неблагоприятны, например, с точки зрения ее эрозионной активности.

Технологические загрязнения образуются на деталях, как при их изготовлении, так и в процессе ремонта и сборки. Их характер зависит от особенностей технологических процессов восстановления деталей, уровня культуры производства и пр. Известно, что на заводах по производству тракторов и автомобилей около половины всех неисправностей, обнаруживаемых после сборки машин, вызывается недостаточным соблюдением чистоты на рабочих местах.

К технологическим загрязнениям относятся металлическая стружка, жировые и масляные смазки, остатки доводочных паст и др. Наибольшую трудоемкость, с точки зрения, удаления загрязнения представляет очистка деталей от доводочных паст. Из деталей топливной аппаратуры наиболее высокого качества очистки требуют прецизионные детали дизельных двигателей (плунжерные пары, нагнетательные клапаны и распылители форсунок). Не полностью удаленные с поверхностей обработанных деталей абразивные зерна, содержащиеся в доводочных пастах, приводят к интенсивному износу в сопряжениях прецизионных узлов.

При этом важной особенностью технологического процесса обработки прецизионных деталей гидропривода, рабочие зазоры которых составляют 0,005...0,035 мм, является необходимость обеспечения тщательной очистки от технологических загрязнений. Остатки

абразивного зерна, в том числе шаржированные в доводимые поверхности конструкционных материалов, самым негативным образом влияют на безотказность и долговечность прецизионных узлов и агрегатов.

Исследованиями установлено, что наибольшую эффективность при удалении шаржированных в поверхность деталей частиц абразива имеет ультразвуковая высокоамплитудная очистка, которая обеспечивает практически полное удаление частиц абразива, размеры которых превышают 2,5 мкм. При этом разработанная технология не приводит к кавитационному разрушению очищаемой поверхности вследствие создания мягкого акустического режима, когда эффективность удаления частиц обеспечивается пульсирующими кавитационными пузырьками и акустическими потоками разного масштаба.

### Интенсификация сборочно-разборочных операций

Использование вибраций ультразвукового частотного диапазона для сборки и разборки деталей – перспективное направление ультразвуковой технологии. Преимущества применения ультразвука можно обосновать следующими положениями:

- наложение ультразвуковых колебаний на один из элементов твердой фрикционной пары значительно снижают коэффициент трения;

- любая сопряженная пара деталей является гетерогенной системой, в которой при правильно выбранном внешнем механическом воздействии могут создаваться разностные межэлементные силовые реакции, приводящие к разборочным перемещениям в системе;

- под действием ультразвука заметно интенсифицируется проникновение жидкости в капиллярные зазоры. При ультразвуковом замачивании узлов ускоренное проникновение технологической жидкости в зазор между сопряженными поверхностями пары способствует снижению в ней сопротивления трению;

- в ряде технологически важных ситуаций ультразвуковая разборка с минимальными межоперационными потерями может быть совмещена с ультразвуковой очисткой, эффективность которой не вызывает сомнений.

Наиболее распространёнными видами соединений деталей транспортной техники являются резьбовые (до 70 %) и прессовые (до 20 %).

Поскольку усилие сборки и разборки резьбовых соединений складывается из трения в

резьбе (30...40 % от общего усилия), трения торца гайки и болта о собираемые поверхности (40...50%) и усилия затяжки (10...20 %), наложение ультразвуковых колебаний способствует значительному снижению трения в элементах резьбы и позволяет повысить качество соединения.

Наложение ультразвуковых колебаний на элементы резьбового соединения позволяет до 30...35 % повысить значение момента 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.

Результаты исследования [10] показывают, что амплитуда колебаний оказывает значительное влияние на изменение момента закручивания/откручивания резьбовых соединений. Наибольший результат наблюдается при достижении амплитуд колебания излучателя  $\xi_m = 20...25$  мкм, при которых момент закручивания (откручивания) снижается до 2 раз. Дальнейшее увеличение амплитуды колебаний не приводит к повышению технологического эффекта.

Получение прессовых соединений показало, что с увеличением натяга в соединении влияние ультразвуковых колебаний на изменение коэффициента трения при сборке возрастает.

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

- наложение колебаний на охватывающую деталь снижает требуемое усилие пресса при механической сборке;

- наложение колебаний на запрессовываемую деталь при гидропрессовой сборке позволяет снизить давление 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 позволяет снизить величину требуемого зазора и, следовательно, требуемую температуру нагрева.

Высокая скорость ультразвуковой разборки и ее нейтральность по отношению к состоянию поверхностей связаны с тем, что при наличии высокочастотных колебательных перемещений деталей друг относительно друга изменяется характер сил трения. Сила сухого трения приобретает особенности, характерные для квазивязкого трения.

Ультразвуковая разборка как отдельный, самостоятельный процесс в технологии производства и ремонта транспортных изделий встречается редко. Предшествующие или последующие за ультразвуковой разборкой технологические операции, как правило, связаны с очисткой от загрязнений технологического и эксплуатационного характера.

Результаты многолетних исследований по ультразвуковой высокоамплитудной очистке легли в основу создания совмещенного технологического процесса очистки и разборки прецизионных деталей.

Технологический процесс состоит из 5-ти операций: размочки (предварительной очистки); ультразвуковой разборки и очистки; ополаскивания чистым моющим раствором; пассивации; сушки. Технологический процесс предусматривает индивидуальную обработку каждой сборочной единицы с последующим ее помещением в специальную кассету.

Применение ультразвука для разборки соединений деталей машин позволяет интенсифицировать этот технологический процесс, а также избежать разрушения поверхностей деталей при разборке. Совмещение ультразвуковой очистки и разборки позволяет повысить эффективность этих процессов.

### **Повышение качества получения лакокрасочных покрытий**

Использование комплекса ультразвуковых технологий, состоящих из подготовки лакокрасочных материалов (ЛКМ), подготовки поверхности и нанесения ЛКМ позволяет достичь однородности факела распыла материала, повысить концентрацию аэрозоля, распылять жидкости с высокой вязкостью, что, в свою очередь, обеспечит высокое качество покрытий.

При пневмоультразвуковом распылении обеспечивается локализация основного пятна ЛКМ на удалении от сопла, а также увеличение его площади, что говорит о равномерности работы воздушного потока, которая направлена в основном на перенос капель аэрозоля; этим же объясняется увеличение площа-

ди пятна, так как капли, которые образовывали туман вблизи сопла, переносятся к окрашиваемой поверхности.

Способ нанесения ЛКМ характеризуется высокой производительностью, большим коэффициентом переноса и сочетает в себе преимущества ультразвукового распыления с минимизацией недостатков пневматического.

Для реализации преимуществ ультразвуковых технологий при покраске разработан следующий технологический процесс:

1) ультразвуковая очистка изделий от жиров, пыли и абразивных частиц;

2) ультразвуковая подготовка ЛКМ с целью их гомогенизации;

3) нанесение подготовленного ЛКМ на поверхность изделий методом пневмоультразвукового распыления.

Анализ свойств полученного лакокрасочного покрытия показывает, что предложенная технология по сравнению с типовой обеспечивает:

- возможность однослойного нанесения ЛКМ;

- снижение высотных параметров покрытия в 3 раза;

- повышение микротвёрдости на 40 %;

- увеличение адгезии в 2 раза;

- снижение массового износа в 2 раза;

- снижение расхода растворителя в 3 раза.

Улучшение свойств покрытия связано с суммированием положительных эффектов, возникающих на каждом этапе покраски при применении ультразвука, а также с увеличением времени воздействия на жидкий ЛКМ при его подготовке и распылении.

### **Заключение**

Основой повышения эксплуатационных свойств изделий является формирование требуемых свойств поверхностного слоя. Уменьшение трения и износа, повышение коррозионной и усталостной прочности, и, как следствие, повышение надежности и ресурса – свойства, напрямую зависящие от структуры, твердости, внутренних остаточных напряжений, шероховатости и субшероховатости.

Одним из условий обеспечения качества продукции при производстве, эксплуатации, ремонте, восстановлении, переработке и утилизации является соблюдение требований промышленной чистоты деталей и узлов техники. Кроме того, сохранение чистоты деталей и узлов на протяжении всего жизненного цикла изделия не только обязательное условие

для обеспечения его надежности и долговечности, но и залог соблюдения экономических и экологических требований, культуры производства.

Отдельно необходимо отметить роль сборочно-разборочных операций. Снижение сборочно-разборочных нагрузок, уменьшение трения между сопрягаемыми деталями и сохранность элементов посадок позволяет вернуть в повторную эксплуатацию не менее 25 % соединений.

Завершающим этапом производства большинства изделий машиностроения является нанесение лакокрасочных покрытий. Свойства лакокрасочного покрытия определяют как декоративные, так и защитные свойства изделий.

Анализируя требования, предъявляемые к объектам обработки, а также технологические возможности ультразвука можно утверждать, что использование ультразвуковых технологий эффективно для формирования эксплуатационных свойств поверхностей деталей на протяжении всего жизненного цикла изделий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приходько, В.М., Казанцев, В.Ф., Нигметзянов, Р.И., Фатюхин, Д.С. Научно-технические технологии в машиностроении с применением ультразвука // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 1(01). – С. 29-38.
2. Коноплин, А.Ю., Баурова, Н.И. Особенности подготовки поверхности под склеивание в условиях Арктики // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2018. – № 6. – С. 15-18.
3. Качество машин: справочник. В 2 т.Т.1/ А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
4. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
5. Штефан, Ю.В., Зорин, В.А., Баурова, Н.И. Управление качеством машин и технологических процессов. – М.: Издательство МАДИ, 2016. – 120 с.
6. Казанцев, В.Ф., Кудряшов, Б.А., Нигметзянов, Р.И., Приходько, В.М., Фатюхин, Д.С. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2009. – № 46. – С. 7-9.
7. Казанцев, В.Ф., Лужнов, Ю.М., Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С. Выбор и оптимизация режимов ультразвукового поверхностного деформирования // Вестник Московского автомобильно-дорожного

государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 4 (47). – С. 26-32.

8. Толочко, Н.К., Челединов, А.Н. Кинетические закономерности ультразвуковой очистки деталей машин от загрязнений // Вестник машиностроения. – 2018. – № 6. – С. 69-73.

9. Казанцев, В.Ф. Инструменты для ультразвуковой очистки / В.Ф. Казанцев, Ю.Н. Калачев, Р.И. Нигметзянов и др. – М.: Техполиграфцентр. 2017. – 181 с.

10. Нигметзянов, Р.И., Приходько, В.М., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С. Способы ультразвуковой разборки соединений деталей // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2017. – № 2. – С. 41-46.

## REFERENCES

1. Prikhodko, V.M., Kazantsev, V.F., Nigmatzyanov, R.I., Fatyukhin, D.S. Science intensive technologies with ultrasound use // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – No.1(01). – pp. 29-38.
2. Konoplin, A.Yu., Baurova, N.I. Peculiarities of surface preparation for gluing under Arctic conditions // *All Materials. Encyclopedic Reference Book*. – 2018. – No.6. – pp. 15-18.
3. *Machine Quality: Reference Book*. In 2 Vol., Vol.1 / A.G. Suslov, E.D. Brown, N.A. Vitkevich et al. – M: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 256.
4. Suslov, A.G. *Quality of Machinery Surface Layer*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
5. Shtefan, Yu.V., Zorin, V.A., Baurova, N.I. *Quality Control of Machinery and Engineering Processes*. – M.: MADI Publishers, 2016. – pp. 120.
6. Kazantsev, V.F., Kudryashov, B.A., Nigmatzyanov, R.I., Prikhodko, V.M., Fatyukhin, D.S. Ultrasonic surface plastic deformation // *Bulletin of Kharkov National Road University*. – 2009. – No.46. – pp. 7-9.
7. Kazantsev, V.F., Luzhnov, Yu.M., Nigmatzyanov, R.I., Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S. Choice and optimization of ultrasonic surface deformation modes // *Bulletin of Moscow Road State Technical University (MADI)*.
8. Tolochko, N.K., Chelidinov, A.N. Kinetic regularities of machinery ultrasonic cleaning of dirt // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2018. – No.6. – pp. 69-73.
9. Kazantsev, Yu.V.F. *Tools for Ultrasonic Cleaning* / V.F. Kazantsev, Yu.N. Kalachyov, R.I. Nigmatzyanov et al. – M.: Techpolygraphcenter. 2017. – pp. 181.
10. Nigmatzyanov, R.I., Prikhodko, V.M., Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S. Methods for parts joints ultrasonic dismantling // *Repair. Reconstruction. Updating*. – 2017. – No.2. – pp. 41-46.

Рецензент д.т.н. В.Д. Александров