

УДК 621.048

**М.А. Тамаркин**, д-р техн. наук, проф., **И.Л. Вяликов**, асп.,  
**Э.Э. Тищенко**, канд. техн. наук, доц.  
*Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*  
Тел. (863)2738725, E-mail: tehn\_rostov@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ВИБРОАБРАЗИВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

*В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса виброабразивной ультразвуковой обработки деталей. Выявлены теоретические зависимости для определения основных технологических параметров. Произведено теоретическое обоснование повышения эффективности вибрационной обработки при наложении ультразвукового воздействия с учетом расположения ультразвуковых преобразователей в зоне обработки.*

**Ключевые слова:** виброабразивная ультразвуковая обработка, кавитационно-абразивное разрушение, среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности, съём металла, время обработки.

### 1. Введение

Задача повышения качества продукции связана с совершенствованием известных и разработкой новых, эффективных методов финишной обработки, среди которых ведущее место занимают методы вибрационной обработки (ВиО). Большой интерес исследователей к этому процессу объясняется его широкими технологическими возможностями и существенными технико-экономическими преимуществами. Исследования вибрационной обработки проводились как отечественными учеными (А.П. Бабичев, Ю.В. Димов, И.Ф. Гончаревич, В.П. Кольцов, А.П. Субач, М.А. Тамаркин, В.А. Анпилогоа, М.Е. Шаинский и др.), так и зарубежными специалистами (Матсунага М., Хагиуда У. (Япония), К. Веллингер (ФРГ), В. Брандт (США) и др.).

Непрерывное совершенствование процесса приводит к созданию новых разновидностей ВиО. В настоящее время сформировались два основополагающих направления повышения эффективности ВиО. Первое - интенсификация процесса путём конструктивных изменений оборудования и комбинирования кинематических схем, второе - путём комбинирования различных видов энергии. Предпосылкой к их разработке является принцип комбинирования различных схем обработки и воздействия различных видов энергии (тепловой и механической, механической и химической, электрической и химической и др.). Комбинируя существующие методы вибрационной обработки и создавая новые, можно увеличить производительность обработки, улучшить качество выпускаемых изделий; снизить себестоимость их изготовления, т.к. совмещенные процессы позволяют не только интенсифицировать известные технологические методы, но и реализовать новые физико-химические эффекты при обработке деталей. Поэтому разработка новых комбинированных методов обработки деталей и их технологий является весьма перспективным направлением в развитии науки и создании новой техники.

Одним из перспективных и малоизученных направлений совершенствования процесса ВиО является его интенсификация за счет наложения ультразвукового поля.

Привлекательность ультразвука для интенсификации технологических методов обработки деталей объясняется его уникальными особенностями. Так в ультразвуковом диапазоне можно получить направленное излучение, оно хорошо поддаётся

фокусировке, в результате чего повышается интенсивность ультразвукового поля на ограниченном участке. При распространении в различных средах и твердых телах ультразвук порождает интенсивные явления, многие из которых нашли применение в различных сферах человеческой деятельности, в том числе и технологических целях. Метод виброабразивной ультразвуковой обработки (ВиАУЗО), в зависимости от режимов и характеристики рабочей среды, может быть применен для изготовления деталей машин и приборов на операциях шлифования, полирования, удаления заусенцев и облоя и т.п.

Целью проводимых исследований является установление закономерностей и разработка комбинированного метода высокоэффективной виброабразивной ультразвуковой обработки на основе комплексных исследований параметров процесса.

## **2. Основное содержание и результаты работы**

Вибрационная обработка в зависимости от характера применяемой рабочей среды представляет собой механический или химико-механический процесс съема мельчайших частиц металла и его окислов с обрабатываемой поверхности, а также сглаживание микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды, совершающими в процессе работы колебательное движение [1,2].

Обрабатываемые детали загружаются в рабочую камеру, заполненную рабочей средой требуемой характеристики. Рабочая камера, установленная на упругой подвеске, может колебаться в различных направлениях.

Привод рабочая камера получает от инерционного вибратора с частотой до 50 Гц и амплитудой от 0,5 до 8 мм. В процессе обработки детали и частицы рабочей среды относительно перемещаются, совершая два вида движений: колебания и медленное вращение всей массы загрузки (циркуляционное движение). От стенок рабочей камеры вибрация передается прилегающим слоям рабочей среды, которые сообщают ее следующим слоям и т.д. В процессе обработки детали занимают различные положения в рабочей среде, что обеспечивает достаточно равномерную обработку всех поверхностей. Большое количество микроударов, действующих на обрабатываемую деталь одновременно в различных направлениях, способствует в некоторой степени удержанию ее во взвешенном состоянии. В результате циркуляции обработка происходит во всех зонах рабочей камеры, наиболее эффективно около дна камеры, где давление рабочей среды выше.

Рабочая среда оказывает решающее влияние на достижение качества поверхности и производительность процесса. Выбор рабочей среды производится в зависимости от назначения выполняемой операции, материала и особенностей конфигурации детали, применяемого способа ведения процесса.

Большинство операций ВиО производится с непрерывной или периодической подачей технологической жидкости (ТЖ). ТЖ обеспечивает удаление продуктов износа (частиц металла и абразива) с поверхности деталей и частиц рабочей среды, смачивает детали и среду, помогает их разделению и равномерному распределению деталей в рабочей среде, способствует охлаждению обрабатываемых деталей.

Особенностью ВиАУЗО является то, что в процессе обработки поверхности деталей одновременно подвергаются динамическому воздействию потоков абразивных гранулированных частиц, движение которых инициируется низкочастотными колебаниями стенок рабочей камеры и кавитационно-абразивному разрушению, обусловленному ультразвуковым полем, генерируемым ультразвуковым преобразователем. Результатом совмещенного воздействия этих двух процессов

является повышение интенсивности процесса съёма металла с поверхности обрабатываемых деталей. Несмотря на то, что ведущим процессом в условиях ВиУЗО является виброабразивный, осуществляющий съём металла и формирование параметров качества поверхностного слоя (шероховатости), введение ультразвукового поля позволяет облегчить процесс съёма металла абразивными гранулами, вследствие предварительного разрушения поверхностного слоя обрабатываемых деталей и обеспечить дополнительный съём металла за счёт кавитационно-абразивного разрушения [3].

В качестве основных предпосылок обуславливающих развитие процесса кавитационно-абразивного разрушения, является следующее:

1. Наличие технологической жидкости в рабочей камере.
2. Накопление в массе загрузки тонкодисперсных металлических и абразивных частиц от 0,5 до 5 мкм соизмеримых с радиусом ударной волны, возникающей при захлопывании кавитационной полости.
3. Высокое статическое давление, обусловленное плотностью абразивных гранул, внутри массы загрузки.

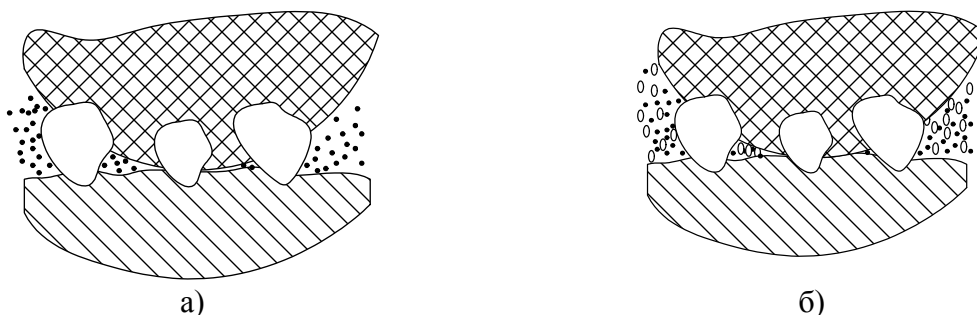


Рис. 1. Схема разрушения поверхности: а – при ВиО, б – при ВиАУЗО

В процессе ВиО главную роль играет непосредственное взаимодействие абразивной гранулы и поверхности детали, мельчайшие тонкодисперсные частицы оказывают небольшое влияние на обработку, так как долго не задерживаются и удаляются с небольшим количеством жидкости.

В процессе ВиАУЗО под воздействием ультразвукового поля тонкодисперсные частицы, перемещаются хаотично со скоростью сообщаемой им в результате захлопывания кавитационных пузырьков, которые, как свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, скапливаются в точках поверхности с наибольшей напряжённостью (вершины и впадины микронеровностей). В момент их схлопывания возникает ударная волна, которая сообщает частицам кинетическую энергию. В результате многократного соударения частиц с поверхностью микронеровностей она подвергается упругопластической деформации, повреждаемости и как следствие разрушению на микроуровне.

Разрушение каждого локализованного микрообъёма поверхности имеет полидеформационный характер и протекает за время кинетического цикла включающего упрочнение-разупрочнение-разрушение. При этом при первой стадии накопление носит латентный (скрытый характер). На второй стадии идёт процесс отделения частиц от поверхности металла. После удаления частиц начинается новые накопления повреждаемости и разрушения на новой совокупности микрообъёмов.

На основе данной интерпритации модель для оценки скорости кавитационно-абразивного разрушения в ультразвуковом поле представим следующим образом:

$$\gamma_{к.р.} = \frac{V_d \cdot P_p}{\tau_0 \exp\left(\frac{\nu_0 - \beta \cdot \sigma}{R \cdot T}\right)} \quad (1)$$

где  $t_u = \tau_0 \exp\left(\frac{\nu_0 - \beta \cdot \sigma}{R \cdot T}\right)$  - продолжительность элементарного акта усталостного разрушения,  $V_d$  - объём материала разрушаемого в процессе кавитационно-абразивного воздействия,  $P_p$  - Вероятность реализации фактического ударно-импульсного деформирования микрообъёма поверхности,  $\tau_0$  - постоянная времени равная периоду атомных колебаний,  $\nu_0$  - энергия активации разрушения материала,  $\beta$  - структурно-чувствительный коэффициент,  $\sigma$  - эквивалентное напряжение,  $R$ - универсальная газовая постоянная,  $T$  - абсолютная температура.

С целью использования полученной модели в инженерной практике сделаем ряд допущений:

1) Примем в качестве количественной характеристики металла, накапливающего повреждения  $Q$  активированный к разрушению микрообъём равный молярному объёму  $V_m$ .

2) Выражение для оценки вероятности разрушения молярного объёма представим следующим образом:

$$P_p = \frac{\pi d_{кр}^2 \cdot F}{\pi D_q^2 \cdot F} = \frac{\rho}{HB} \quad (2)$$

где  $F$ - сила взаимодействия тонкодисперсных частиц с обрабатываемой поверхностью, обусловленная захлопыванием кавитационных пузырьков;  $\rho$  - удельное давление в зоне контакта тонкодисперсных частиц с обрабатываемой поверхностью;  $HB$ -твёрдость материала обрабатываемой детали.

С учётом допущений расчётная модель имеет вид:

$$\gamma_{к.р.} = \frac{V_m \cdot \rho}{HB \cdot \tau_0 \exp\left(\frac{\nu_0 - \beta \cdot \sigma}{R \cdot T}\right)} \quad (3)$$

Для оценки скорости весового разрушения выражение (3) будет иметь вид

$$\gamma_{к.р.} = \frac{V_m \cdot \rho_m \cdot \rho}{HB \cdot \tau_0 \exp\left(\frac{\nu_0 - \beta \cdot \sigma}{R \cdot T}\right)} \quad (4)$$

где  $\rho_m$  - плотность материала обрабатываемой детали

Полученные выражения содержат константы ( $R$ ,  $\tau_0$ ), величины внешних факторов, влияющих на процесс усталостного разрушения ( $T$ ,  $\rho$ ), активационные характеристики материала ( $\nu_0$ ,  $\beta$ ), геометрические характеристики разрушаемой зоны ( $V_m$ ).

В результате обоснования вышеуказанных параметров с учётом размерности было получено выражение для определения скорости кавитационно-абразивного разрушения поверхности в ультразвуковом поле:

$$\gamma_{кр} = K_u \frac{V_m \cdot \rho_m \cdot \rho \cdot N \cdot P_k}{HB \cdot \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta H_{Ts} - 0.3V_m \cdot \rho}{R \cdot T}\right)} \quad (5),$$

где  $P_k$  - вероятность того, что за один оборот массы загрузки деталь попадает в зону ультразвукового воздействия и подвергается кавитационно-абразивному разрушению,  $N$  - количество молярных объёмов одновременно подвергаемых кавитационно-абразивному разрушению на площади квадрата упаковки при нахождении детали в зоне ультразвукового воздействия,  $V_0 = \Delta H_{T_s}$  - предельное искажение кристаллической решетки равное разности теплосодержания (энтальпии) материала в твердом состоянии, при температуре плавления и энтальпии при  $293^0\text{K}$ ,  $V_m$  - молярный объём материала разрушаемого в процессе кавитационно-абразивного воздействия.

Скорость съёма металла с поверхности обрабатываемой детали при ВиАУЗО можно представить в виде суммы:

$$\gamma_0 = \gamma_с + \gamma_{кр}, \quad (6)$$

где  $\gamma_с$  - скорость съёма металла в процессе вибрационного воздействия потока абразивных гранул;

Если принять за единичный элемент площадь квадрата упаковки абразивных гранул обрабатывающей среды на поверхности со стороной равной диаметру описанной окружности радиусом  $R_r$ , то зависимость предложенную в работе [2], для оценки скорости съёма металла в процессе вибрационного воздействия потока абразивных гранул можно представить в виде:

$$\gamma_0 = P_1 \cdot P_2 \cdot \omega \cdot q + K_u \frac{4\sqrt{V_m} \cdot \rho_m \cdot \rho \cdot R_r^2 \cdot P_k}{HB \cdot \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta H_{T_s} - 0.3V_m \cdot \rho}{R \cdot T}\right)}, \quad (7)$$

где  $K_u$  - корректировочный коэффициент интенсивности процесса кавитационно-абразивного разрушения

При этом уравнение продолжительности обработки примет вид:

$$\tau_p = \frac{Q_{кр}}{\gamma_0}, \quad (8)$$

где  $Q_{кр}$  - объём металла, который необходимо удалить с поверхности для решения технологической задачи;  $\gamma_0$  - скорость разрушения поверхности в процессе обработки.

В качестве предельного съёма металла при ВиАУЗО. в зависимости от решаемой технологической задачи может быть принята одна из следующих величин:

- масса дефектного слоя металла толщиной  $\Delta L$ , удаляемого с площади квадрата упаковки

$$Q = 4R_r^2 \Delta L \cdot \rho_m, \quad (9)$$

- объём металла исходного микропрофиля  $Rz_{исх}$  на площади ограниченного квадратом упаковки, требующий удаления для получения установившейся шероховатости

$$W = k_{np} Rz_{исх} 4R_r^2, \quad (10)$$

где  $k_{np}$  - коэффициент, учитывающий вид профиля исходной шероховатости,  $0.43R^2 \cdot r$  - объём металла удаляемого с острых кромок для получения закругления требуемого радиуса.

В процессе обработки свободными абразивами, как отмечают многие исследователи, изменение шероховатости поверхности имеет экспоненциальный характер.

$$Ra = (Ra_{исх} - Ra_{уст}) \exp(-k_u \cdot \tau) + Ra_{уст} , \quad (11)$$

где  $Ra_{исх}$  - среднее арифметическое отклонение профиля исходной шероховатости;  $Ra_{уст}$  - среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости;  $k_u$  - коэффициент интенсивности изменения параметров микрорельефа,  $c^{-1}$ , зависящий от режимов обработки и характеристик рабочих сред.

Зависимость для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости согласно [2]:

$$Ra_{уст} = 0,09 \cdot K_{уз} \sqrt{\frac{h_{max} \cdot L_{ед}}{z_0}} , \quad (12)$$

где  $K_{уз}$  - коэффициент ультразвукового воздействия,  $h_{max}$  - максимальная глубина внедрения частицы,  $L_{ед}$  - единичная длина,  $z_0$  - количество зерен над единицей поверхности связки.

При экспериментальных исследованиях ВиАУЗО необходимо выяснить, каким образом должны быть эффективно приложены ультразвуковые колебания, чтобы обеспечить интенсификацию обработки, с точки зрения повышения производительности процесса, улучшения характеристик качества поверхности и эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей.

Для введения ультразвуковых колебаний в рабочую камеру вибрационного станка рационально использовать магнитострикционные ультразвуковые преобразователи. Они предназначены для преобразования энергии электрических колебаний в механические колебания, питание они получают от ультразвукового генератора, предназначенного для преобразования электрического тока промышленной частоты в ток высокой частоты.

Для охлаждения магнитострикционных преобразователей необходимо использовать прокачку жидкостью.

Ультразвуковые магнитострикционные преобразователи различаются по своей конструкции, они бывают прямоугольной формы типа ПМС 6-22 (излучатель-пластина прямоугольной формы 300x300 мм), и цилиндрической формы типа ЦМС-8 (излучатель-цилиндр, длина 350мм диаметр 160мм).

Для качественной работы ультразвуковых преобразователей необходимо использовать ультразвуковой генератор высокой мощности (не менее 2.5 кВт). Это позволяет стабильно обеспечить требуемые параметры ультразвуковых колебаний.

С целью повышения эффективности ВиО, можно осуществлять различные варианты расположения ультразвуковых преобразователей в зоне обработки. При этом они могут быть закреплены, как в рабочей камере вибрационного станка и совершать вместе с ней низкочастотные колебания, которые будут передаваться рабочей среде, так и на дополнительном устройстве установленном неподвижно.

Очевидно, что при этом размещение ультразвукового преобразователя не должно мешать движению рабочей камеры и циркуляции обрабатываемой среды, а так же не снижать производительность ВиО в зонах наибольшей интенсивности обработки. Исходя из выше сказанного, можно предложить такие варианты размещения и закрепления ультразвуковых преобразователей в зоне вибрационной обработки:

- расположение ультразвукового преобразователя над рабочей камерой, с возможностью погружения в обрабатываемую среду;
- расположение ультразвукового преобразователя сбоку рабочей камеры;
- расположение ультразвукового преобразователя вместо задней или передней стенки рабочей камеры;
- расположение ультразвукового преобразователя в центральной зоне рабочей камеры;
- расположение ультразвукового преобразователя на дне или вместо дна рабочей камеры.

Из выше приведенных было выбрано три варианта:

1. Расположение ультразвукового преобразователя вместо задней стенки рабочей камеры (рис. 1)

При этом варианте ультразвуковой преобразователь не препятствует циркуляции рабочей среды, передаёт среде как высокочастотные, так и низкочастотные колебания, распространяемые в одном направлении, конструкция камеры сравнительно проста, сохраняется цельность эластичного покрытия рабочей камеры.

Преимуществом рассматриваемой схемы, является ее высокая универсальность, так как сохраняется неизменность конструкции и геометрии рабочей камеры, что позволяет при необходимости использовать приспособления для крепления деталей при обработке.

2. Фиксация ультразвукового преобразователя над камерой на уровне верхнего слоя рабочей среды (рис. 2). При этом обеспечивается ее поджатие на определенную величину, что приводит к увеличению сил соударения частиц между собой и обрабатываемыми деталями в зоне низкого давления и как следствие повышению интенсивности обработки.

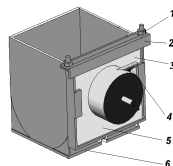


Рис. 1. Конструкция рабочей камеры для ВиАУЗО деталей в свободном состоянии с расположением ультразвукового преобразователя в стенке рабочей камеры: 1 – резьбовые соединения; 2 – крепление; 3 – смотровой люк; 4 – штуцер для подачи охлаждающей жидкости; 5 – ультразвуковой преобразователь; 6 – рабочая камера

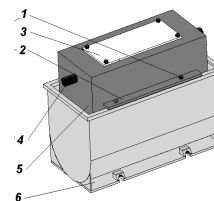


Рис. 2. Конструкция рабочей камеры для ВиАУЗО деталей в свободном состоянии с расположением ультразвукового преобразователя над рабочей камерой: 1 – резьбовые соединения; 2 – крепление; 3 – смотровой люк; 4 – штуцер для подачи охлаждающей жидкости; 5 – ультразвуковой преобразователь; 6 – рабочая камера

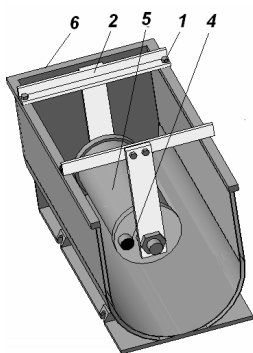


Рис. 3. Конструкция рабочей камеры для ВиАУЗО деталей в свободном состоянии с расположением ультразвукового преобразователя у дна рабочей камеры: 1 – резьбовые соединения; 2 – крепление; 4 – штуцер для подачи охлаждающей жидкости; 5 - ультразвуковой преобразователь; 6 - рабочая камера

3. Расположение преобразователя в центральной зоне рабочей камеры (рис. 3), что обеспечивает дополнительное введение низкочастотных колебаний в малоэффективной зоне, которые при базовой схеме вибрационной обработки гасятся за счет потери энергии при прохождении многослойной рабочей среды. При этом создается возможность равномерного прохождения слоёв рабочей среды относительно источника ультразвуковых колебаний и значительно уменьшается длина их распространения по сечению рабочей камеры, а, следовательно их гашение будет минимальным.

На основании результатов предварительных экспериментальных исследований установлено, что наиболее эффективной является схема с размещением ультразвукового преобразователя в центральной зоне рабочей камеры. Дальнейшие экспериментальные исследования были выполнены на основе использования этой схемы.

Были проведены исследования влияния распространения ультразвуковых колебаний на съём металла и шероховатость поверхности.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 4-8.

Исследование микрорельефа обработанной поверхности осуществлялось на сканирующем зондовом микроскопе «Nanoeducator»: образцы 15x15x2, материал Д16Т, после 60 минут обработки.

Исследование изменения профиля поверхности в зависимости от метода обработки представлено на рисунках 7,8.

По результатам исследований (рис. 7,8) установлено, что после ВиАУЗО на поверхности обрабатываемой детали образуется развитый субмикрорельеф, что подтверждает гипотезу о её кавитационно-абразивном разрушении.

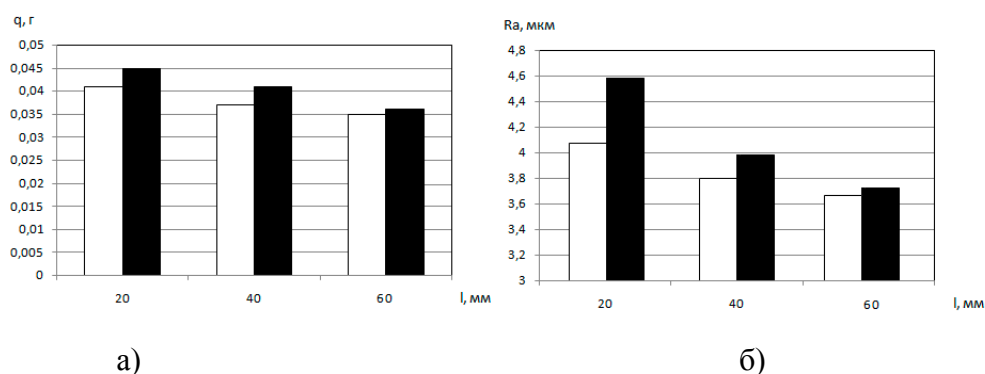
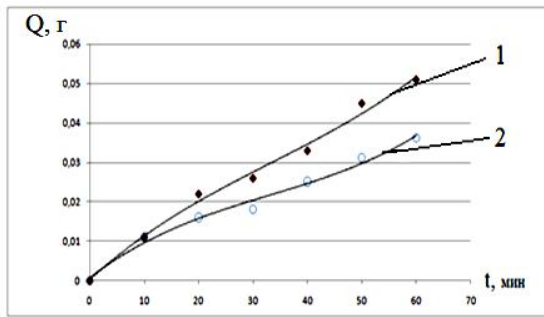


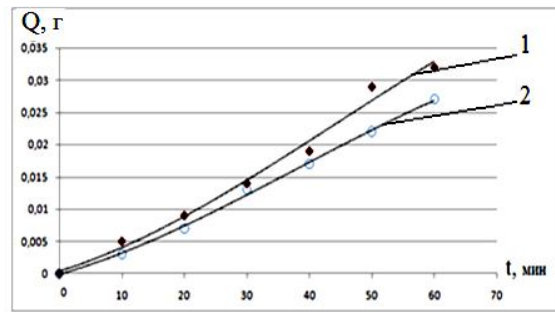
Рис. 4. Результаты исследования влияния распространения ультразвуковых колебаний на съём металла а) и шероховатость поверхности б) (белым цветом – ВиО, черным - ВиАУЗО). Материал - Д16Т. l – расстояние от ультразвукового преобразователя до места закрепления образца





1 - виброобразивная ультразвуковая обработка  
2 - виброобразивная обработка  
Обработка образцов из материала: алюминиевый сплав Д16Т

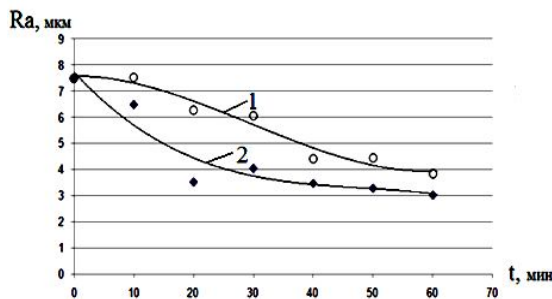
а)



1 - виброобразивная ультразвуковая обработка  
2 - виброобразивная обработка  
Обработка образцов из материала: сталь 3

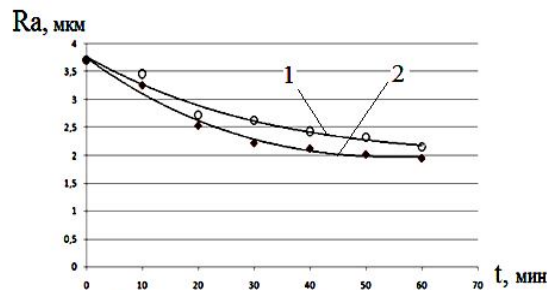
б)

Рис. 5. Влияние продолжительности ВиАУЗО на величину съема металла при размещении ультразвукового преобразователя в центральной зоне рабочей камеры: а) - алюминиевый сплав Д16Т, б) – сталь 3



1 - виброобразивная обработка  
2 - виброобразивная ультразвуковая обработка  
Обработка образцов из материала: алюминиевый сплав Д16Т

а)



1 - виброобразивная обработка  
2 - виброобразивная ультразвуковая обработка  
Обработка образцов из материала: сталь 3

б)

Рис. 6. Влияние продолжительности ВиАУЗО на шероховатость поверхности при размещении ультразвукового преобразователя в центральной зоне рабочей камеры: а) - алюминиевый сплав Д16Т, б) – сталь 3

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований подтвердили правильность теоретических предпосылок.

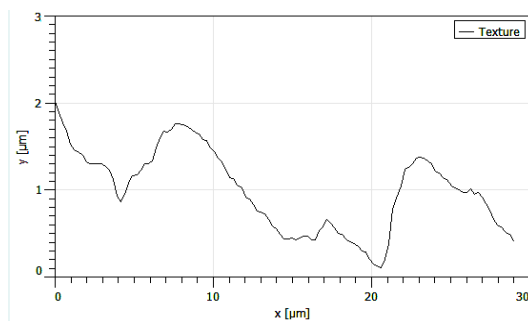


Рис. 7. Профиль обработанной поверхности – ВиО

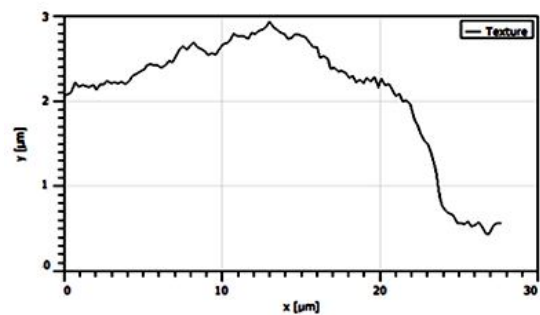


Рис. 8. Профиль обработанной поверхности - ВиАУЗО

На основании результатов исследований разработаны рекомендации по проектированию средств технологического оснащения для ВиАУЗО, выбору характеристик рабочих сред и режимов ВиАУЗО при решении различных технологических задач.

### **3. Общие выводы**

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности и разработан высокоэффективный комбинированный метод виброабразивной ультразвуковой обработки.

Разработана технологическая схема и образцы лабораторно - промышленного оборудования для ВиАУЗО.

Произведено теоретическое обоснование повышения эффективности вибрационной обработки при наложении ультразвукового воздействия.

Установлены основные закономерности влияния ВиАУЗО на производительность обработки и качество обработанной поверхности.

Разработаны методические рекомендации для проектирования эффективных технологических процессов ВиАУЗО.

### **Список литературы:**

1. Разработка и исследование технологической схемы вибро-ультразвуковой обработки / А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин, И.Л. Вяликов, Н.С. Коваль // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №8.
2. Тамаркин М.А. Технологические основы оптимизации обработки деталей в гранулированных рабочих средах / М.А. Тамаркин // Известия ВУЗов. Сев. – Кавк. Регион. Техн. науки. – 2005. – Спец. вып.: Проблемы машиностроения (к 75-летию Донского государственного технического университета).
3. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. - М., 1970.

Надійшла до редакції 15.02.2014

**М.А. Тамаркин, И.Л. Вяликов, Э.Э. Тищенко**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ**

*У статті представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу виброабразивної ультразвукової обробки деталей. Виявлено теоретичні залежності для визначення основних технологічних параметрів. Здійснено теоретичне обґрунтування підвищення ефективності вібраційної обробки при накладенні ультразвукового впливу з урахуванням розташування ультразвукових перетворювачів в зоні обробки.*

**Ключові слова:** *віброабразивна ультразвукова обробка, кавітаційно-абразивне руйнування, середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості поверхні, знімання металу, час обробки.*

**M.A. Tamarkin, I.L. Vialikov, A.A. Tishchenko**

### **RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE PROCESS OF VIBROABRASIVE ULTRASONIC TREATMENT OF PARTS**

*The article presents the results of theoretical and experimental studies of the process of vibroabrasive ultrasonic treatment of parts. We found theoretical dependences for definition of basic technological parameters. We justified theoretically the increase of efficiency of vibratory processing when applying ultrasonic influence with respect to the location of ultrasonic transducers in the treatment area.*

**Keywords:** *vibroabrasive ultrasonic treatment, cavitation-abrasive destruction, average deviation of surface roughness profile, metal removal, processing time.*