

УДК 621.9.048

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОПЕРАЦИЙ ВИБРООБРАБОТКИ И ОБЛАСТЬ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИХ ДОСТИЖЕНИЯ****Мицьк А.В.****SCIENTIFIC BASIS FOR DETERMINING THE CRITERIA AND MATHEMATICAL SIMULATION OF VIBRATION TREATMENT OPERATIONS AND THE FIELD OF RATIONALE PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL PROCESS TO ACHIEVE THEM****Mitsyk A.V.**

*Дана физическая сущность процесса виброобработки, а также особенности механики рабочей среды и технологические возможности виброобработки. Указаны отличительные признаки виброобработки, получена механо-физико-химическая модель разрушения поверхности детали. Приведены критерии операции виброобработки и аналитические выражения для их расчета. Даны технологические рекомендации по выбору параметров для различных операций виброобработки. Проведено математическое моделирование кинематики рабочей среды. Приведены исходные уравнения и граничные условия движения рабочей среды. Предложены решения упрощенных уравнений Навье-Стокса.*

**Ключевые слова:** операции виброобработки, рабочая среда, съем металла, шероховатость поверхности, циркуляция среды, механо-физико-химическая модель, критерии операций, схемы энергетического воздействия, уравнения Навье-Стокса.

**Общие сведения.** Долговечность и надежность машин в значительной мере зависят от точности их изготовления, качества и состояния физико-механических свойств поверхностных слоев сопрягаемых деталей. На современном этапе развитие машиностроения невозможно без постоянного улучшения качества деталей выпускаемых изделий, повышения производительности труда, решения организационно-экономических задач и эффективности производства при минимизации затрат.

При этом, как правило, предъявляются повышенные требования в отношении точности размеров, уменьшения шероховатости поверхности, придания ей особого вида в эстетических или санитарно-гигиенических целях. Выполнить такие требования можно при достижении особых качеств поверхностных слоев деталей. Достигнуть их

традиционными методами формообразования и механической обработки поверхности удастся не всегда. В этой связи в наиболее благоприятной ситуации для поставленных целей находится технология виброобработки, реализуемая при использовании вибрации низкой частоты.

**Физическая сущность процесса виброобработки.** Состоит в том, что в «U» – образный резервуар помещают рабочую среду, обрабатываемые детали и другие интенсифицирующие добавки. Далее резервуар с помощью внешнего источника энергии сообщают циклоидно-трахоидные колебательные движения, приводя гранулированную среду в состояние виброкипения. При этом среда совершает циркуляционное движение в направлении обратном движению рабочих поверхностей резервуара. В результате относительного перемещения и взаимного давления гранул среды и обрабатываемых деталей происходят процессы микрорезания и упругопластического деформирования, что обеспечивает удаление дефектного слоя металла, а также уменьшение шероховатости поверхности деталей. Эффективность процесса определяется кинематикой и динамикой виброкипящей гранулированной среды [1, 2].

**Особенности механики рабочей среды и технологические возможности виброобработки.** Исследования, выполненные с использованием скоростной киносъемки, позволили установить характерные особенности динамики рабочей среды в технологической системе. Отмечено, что в течение одного периода колебаний имеет место отход гранул рабочей среды от стенок резервуара и последующая встреча обоих. Такое явление является причиной возникновения циркуляционного

движения среды [3]. Также установлено, что сферическая поверхность днища резервуара при нижнем горизонтальном расположении инерционного вибровозбудителя, оказывает в 1,2...1,5 раза большее силовое воздействие на загруженную в резервуар среду и детали, чем прямолинейные поверхности его стенок [4].

Необходимо отметить, что основными физическими элементами многих методов и процессов механической обработки является микрорезание и пластическое деформирование. Учитывая, что в физической модели виброобработки отсутствует жесткая связь детали и рабочей среды и тем самым исключается возможность эффективного и регулируемого влияния на геометрические размеры и форму детали. Поэтому процесс виброобработки принимается безразмерным, то есть не определяющим форму и размеры обрабатываемых деталей.

С другой стороны отсутствие жесткой кинематической связи не только ограничивает, но и расширяет технологические возможности виброобработки. Так, отсутствие жесткой связи деталей и рабочей среды, и равномерная обработка всей поверхности, с которой контактирует рабочая среда, обеспечивают обработку различных деталей простой и сложной формы, а наличие перемешивания и текучести рабочей среды создает условия для эффективного применения процесса при обработке кромок, заусенцев и облоя.

Таким образом, сочетание таких элементов процесса, как последовательность нанесения множества микроударов, интенсивное перемешивание рабочей среды и обрабатываемых деталей при различной их взаимной ориентации в зависимости от состава и характеристик рабочей среды, а также режимов вибрации, создает условия для выполнения операций, связанных с очисткой литых заготовок, удалением облоя, очисткой от окалины и коррозии, удалением заусенцев, скруглением острых кромок и др. Воздействие химически-активных растворов способствует интенсификации указанных операций и приданию виброобработке дополнительных возможностей [5].

Интенсивность протекания процесса и реализация перечисленных возможностей виброобработки определяются в значительной мере его основными параметрами и их уровнем. Скорость соударения гранул рабочей среды может достигать 0,5...1,0 м/с, ускорение 20...150 м/с<sup>2</sup>, сила соударения может быть 15...30 Н и более, контактные давления в зоне соударений достигают 6500...14500 Н/мм<sup>2</sup>, что обеспечивает деформацию и разрушение материала, средняя температура в резервуаре вибростанка обычно не превышает 30...40 °С и является следствием взаимного соударения и трения гранул среды обрабатываемых деталей и рабочих поверхностей резервуара [6].

**Отличительные признаки процесса виброобработки.** С определенными допущениями, учитывая результаты электронно-микроскопического исследования можно предположить, что процесс виброобработки зависит от характера локального контакта рабочих зерен гранулы рабочей среды с тонким поверхностным слоем материала обрабатываемой детали. Установлено, что при взаимодействии деталей с массой колеблющихся и перемещающихся абразивных гранул происходит взаимное интенсивное разрушение твердых тел, то есть так называемый процесс взаимной приработки. Характер динамических нагрузок в зоне контакта гранул и деталей принципиально отличает процесс виброобработки от других известных отделочно-зачистных методов. К отличительным признакам процесса виброобработки можно отнести следующие:

- зерна абразивных гранул нагружаются достаточно равномерно и глубина внедрения каждого из них имеет высокую стабильность;

- постоянно обеспечивается чередование деформирующих и режущих зерен, что объясняется прерывностью взаимодействия зерен с поверхностью деталей;

- наличие колебаний обеспечивает уменьшение сил трения на контактных поверхностях гранул среды и детали;

- благодаря незначительным размерам абразивная гранула пропитывается химически-активным раствором и обеспечивает его подачу в зону взаимного контакта с обрабатываемой поверхностью;

- обеспечивается снижение сил микрорезания и контактной температуры.

При наличии таких признаков создаются условия образования более однородного поверхностного слоя, устраняется возможность возникновения грубых следов разрушения. Отмечается, что в точках фактического контакта тел возникает сложный спектр напряжений, происходит микрорезание, упругопластическая деформация со значительным увеличением плотности дислокаций и образованием активных дислокационно-вакансионных центров [1].

**Механо-физико-химическая модель процесса виброобработки.** Анализ отличительных признаков процесса виброобработки позволяет построить следующую механо-физико-химическую модель процесса разрушения поверхности детали в среде колеблющихся гранул свободной абразивной среды (рис. 1).

Таким образом интенсивность съема металла при виброобработке зависит от интенсивности механического и химического воздействия и способности материала детали сопротивляться действию указанных процессов.

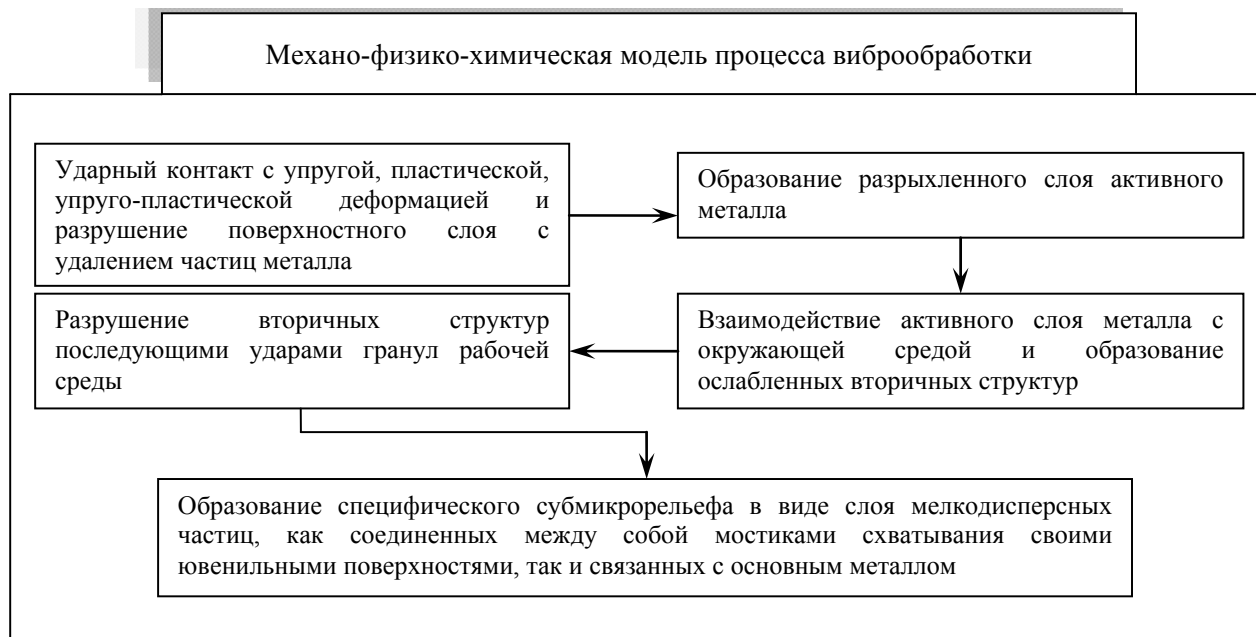


Рис. 1. Модель процесса разрушения поверхности детали в среде колеблющихся гранул свободной абразивной среды

В связи с рассмотренной моделью разрушения поверхностного слоя обрабатываемой детали представляет интерес определения соотношения каждого из перечисленных этапов процесса, доли участия каждого из них в общем процессе обработки. Ориентировочно соотношение процессов микрорезания и упругопластического деформирования составляет 30...35 и 70...65 % [1].

#### Критерии операций виброобработки.

Принимая во внимание, априорную информацию к критериям операции виброобработки будет, справедливо, в первую очередь, отнести сьем металла и шероховатость обработанной поверхности. Такие критерии, как уже говорилось, позволяют дать количественную и качественную оценку состоянию виброобработки при достижении требуемого технологического результата в изготовлении широкой номенклатуры деталей, выполненных из различных металлов и их сплавов.

Кроме того, следует в качестве критерия операции виброобработки обратить внимание на траекторию движения рабочей среды в резервуаре. Ее характер, в первую очередь, определяет интенсивность циркуляционного движения среды, влияющую на производительность процесса и, во вторую очередь, имеет прямую технологическую связь с операциями виброобработки при достижении требуемого технологического результата. Так же в зависимости от выбранной траектории движения среды в резервуаре определяются конструктивные характеристики упругой подвески резервуара.

На основании результатов обработок образцов из различных материалов определены усредненные значения сьема металла с единицы площади

поверхности в единицу времени, обеспечивающие достижение шероховатости поверхности, требуемой различными операциями виброобработки. Амплитуда и частота колебаний резервуара, и размеры гранул среды в области рациональных значений определены из условий влияния технологических параметров процесса на эффективность виброобработки. Результаты эксперимента представлены технологическими рекомендациями (табл. 1).

Анализируя состояние технологических процессов виброобработки можно отметить, что получение высокой шероховатости поверхности, соответствующей операции чернового шлифования, сопровождается наибольшим сьемом металла для всех исследуемых материалов. Такой результат за минимальное время обработки может быть получен при сочетании параметров  $A = 3,5...4,0$  мм,  $\omega = 52...70$  Гц,  $d = 25...35$  мм, область которых для данной операции принята рациональной.

Операции шлифования, обеспечивающие при обработке дальнейшее последовательное уменьшение шероховатости поверхности на величину, соответствующую трем классам ее чистоты, характеризуются снижением сьема металла от класса к классу в среднем на 30...38 %. Такое качество поверхности может быть получено: при шероховатости  $R_a = 5,0...2,5$  мкм сочетанием параметров  $A = 3,0...3,5$  мм,  $\omega = 52...72$  Гц,  $d = 25...35$  мм; при шероховатости  $R_a = 2,5...1,25$  мкм сочетанием параметров  $A = 2,5...3,0$  мм,  $\omega = 43...61$  Гц,  $d = 25...35$  мм; при шероховатости  $R_a = 1,25...0,63$  мкм

сочетанием параметров  $A = 2,0 \dots 2,5$  мм,  $\omega = 34 \dots 52$  Гц,  $d = 15 \dots 25$  мм. Операции чистового и тонкого шлифования в свою очередь уменьшают шероховатость обрабатываемой поверхности на величину, соответствующую двум

классам ее чистоты. При этом съем металла от класса к классу снижается в среднем на 50 %. Достижимое качество поверхности обеспечивается следующей областью рациональных сочетаний

Таблица 1

## Технологические рекомендации по выбору параметров процесса для различных операций виброобработки

Операции виброобработки	Исходная шероховатость поверхности, $R_a$ , мкм	Требуемая шероховатость поверхности, $R_a$ , мкм	Материал изделия	Съем металла, $Q$ , мг/ч·см <sup>2</sup>	Амплитуда колебаний резервуара, $A$ , мм	Частота колебаний резервуара, $\omega$ , Гц	Размер гранул рабочей среды, $d$ , мм
1	2	3	4	5	6	7	8
Черновое шлифование	20,0...10,0	10,0...5,0	Сталь 45	6,0...7,5	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	13,5...17,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	32,0...40,0	3,0	52	–
					3,5	61	–
4,0	70	–					
Шлифование	10,0...5,0	5,0...2,5	Сталь 45	5,0...6,0	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	12,5...14,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	28,0...35,5	3,0	52	–
					3,5	61	–
4,0	70	–					
Шлифование	5,0...2,5	2,5...1,25	Сталь 45	3,5...5,0	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	8,5...12,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	20,0...25,0	3,0	52	–
					3,5	61	–
4,0	70	–					
Шлифование	2,5...1,25	1,25...0,63	Сталь 45	2,0...3,5	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	4,5...8,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	11,5...18,0	3,0	52	–
					3,5	61	–
4,0	70	–					
Чистовое шлифование	1,25...0,63	0,63...0,32	Сталь 45	1,0...2,0	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	2,5...4,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	5,0...9,5	3,0	52	–
					3,5	61	–
4,0	70	–					
Тонкое Шлифование	0,63...0,32	0,32...0,16	Сталь 45	0,5...1,0	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	1,2...2,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	2,5...5,0	3,0	52	–
					3,5	61	–
4,0	70	–					
Полирование	0,32...0,16	0,16...0,08	Сталь 45	$\leq 2,5$	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	$\leq 2,5$	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	$\leq 2,5$	3,0	52	–
					3,5	61	–
4,0	70	–					

параметров: при шероховатости  
 $R_a = 0,63 \dots 0,32$  мкм –  $A = 1,5 \dots 2,0$  мм,  $\omega = 25$  Гц,  
 $d = 5 \dots 15$  мм; при шероховатости  
 $R_a = 0,32 \dots 0,16$  мкм –  $A = 1,0 \dots 1,5$  мм,  
 $\omega = 1,0 \dots 1,5$  Гц,  $d = 5 \dots 15$  мм.

При шероховатости поверхности  $R_a = 0,16 \dots 0,08$  мкм, получаемой на операции полирования, съем металла практически отсутствует, так как технологической задачей операции в отличии от рассмотренных ранее, где обрабатываемые поверхности изделия при удалении дефектного слоя сохраняли матовый оттенок, в первую очередь является придание обрабатываемым поверхностям глянцевого оттенка. Требуемый технологический результат за минимальное время обработки может быть достигнут при использовании сочетания параметров:  $A = 1,0 \dots 1,5$  мм,  $\omega = 25 \dots 52$  Гц,  $d = 5$  мм.

Количественная и качественная оценка процесса виброобработки как правило проводится при анализе данных экспериментальных обработок деталей в различных технологических условиях. Однако, вместе с тем, в теории виброобработки получены следующие аналитические выражения:

1. По расчету съема металла в единицу времени с единицы площади поверхности [2]:

$$Q = \frac{28 \cdot 10^{-6} P_N^2 t \omega (m + M) \delta}{c \rho_x^2 \tau_S m M}, \quad (1)$$

где  $Q$  – съем метала;  $P_N$  – нормальная составляющая силы косоуго удару гранулы рабочей среды;  $t$  – время обработки;  $\omega$  – частота колебаний резервуара;  $m$  – масса гранулы рабочей среды;  $M$  – масса обрабатываемой детали;  $c$  – коэффициент, учитывающий число одновременно контактирующих зерен гранулы среды;  $\rho_x$  – радиус отпечатка зерна гранулы среды;  $\tau_S$  – величина контактных касательных напряжений.

2. По расчету высоты микрошероховатости обрабатываемой поверхности [2]:

$$H_{cp} = \frac{106 \eta A \omega m M}{c \sigma_S \rho_x (m + M)}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – абразивная способность гранулы среды;  $A, \omega$  – амплитуда и частота колебаний резервуара;  $m$  – приведенная масса гранулы среды;  $M$  – приведенная масса обрабатываемой детали;  $c$  – коэффициент, учитывающий число одновременно работающих зерен;  $\sigma_S$  – прочность материала детали на растяжение;  $\rho_x$  – диаметр лунки от внедрения абразивного зерна.

Для проверки зависимостей (1) и (2), и установления границ их применения проводились соответствующие экспериментальные исследования [7]. Они показывают хорошую сходимость полученных экспериментальных результатов с расчетами.

Приведенная методика и аналитические выражения для расчета величины основных критериев операции виброобработки и определения области рациональных параметров технологического процесса для достижения критериев справедливы для традиционных процессов виброобработки, в которых рабочая среда подвергается одноосемному энергетическому воздействию со стороны рабочего органа вибростанка.

Однако в настоящее время, когда разработаны и внедрены прогрессивные мультиэнергетические технологии [8, 9], основанные на комбинировании различных схем энергетического воздействия, когда на рабочую среду производится не только динамическое воздействие рабочих поверхностей резервуара, но и дополнительное воздействие обрабатываемых деталей, смонтированных на специальных установочных приспособлениях, совершающих автономное движение и представляющих собой независимую колебательную или центробежную систему [10]. При таком механизме обработки в резервуаре вибростанка создается комбинированный характер волнового колебательного или другого (например, кругового центробежного) движения слоев и потоков рабочей среды, свободно проникающих ко всем труднодоступным поверхностям обрабатываемых деталей, что приводит к высокой интенсивности обработки, управление которой осуществляют при регулировке механизмов создания движения.

**Математическое моделирование кинематики рабочей среды при виброобработке.** Для более полного понимания и изучения характера движения рабочей среды в резервуаре гибридного вибростанка, реализующего мультиэнергетические технологии необходимо провести математическое моделирование кинематики виброкипящей гранулированной среды при обработке в колеблющемся резервуаре.

Модельные решения позволят рассчитать скорости перемещения потоков среды в любой точке резервуара, что необходимо для определения величин основных критериев операции виброобработки и области рациональных параметров технологического процесса для их достижения. Также моделирование позволит выявить зоны резервуара гибридного вибростанка с повышенным импульсным нагружением при комбинировании схем энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали (рис. 2).

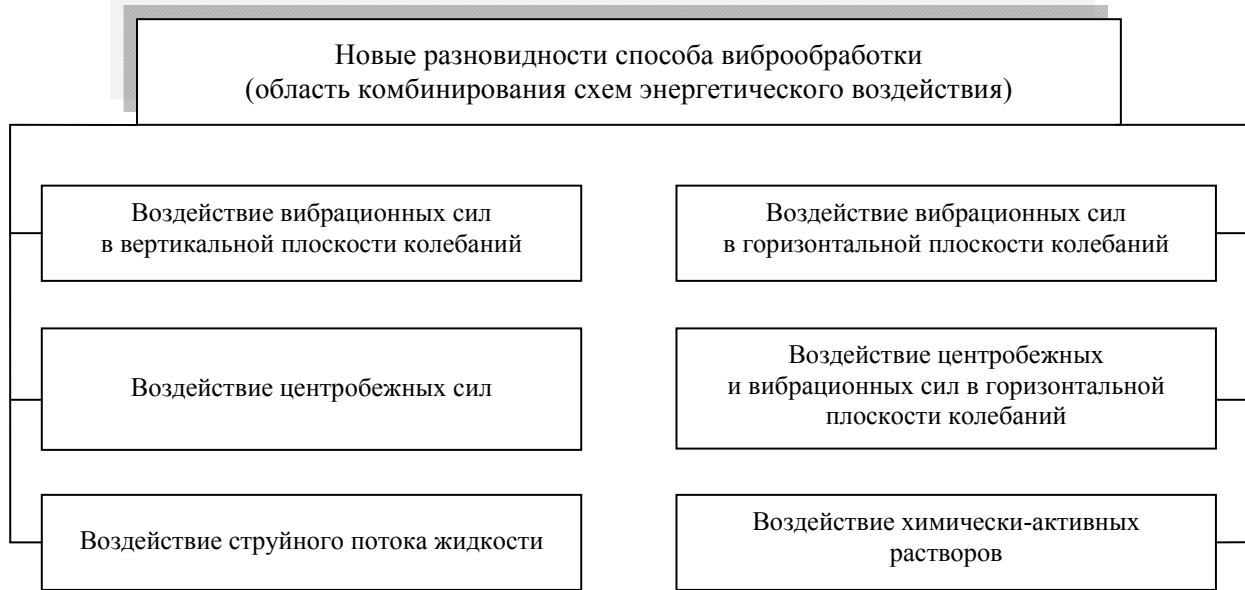


Рис. 2. Схемы энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали в процессе отделочно-зачистной обработки

Такие данные также будут полезны для выбора геометрических размеров резервуара при проектировании агрегатированных отделочно-зачистных станков вибрационного динамического воздействия.

Вернемся к утверждению, что в «U» – образном резервуаре днище в силовом отношении значительно более активно, чем прямолинейные поверхности стенок резервуара.

В этой связи представляет научный интерес рассмотрение кинематики рабочей среды, контактирующей с цилиндрическим днищем «U» – образного резервуара отделочно-зачистного вибростанка. В данной статье движение рабочей среды у цилиндрического днища резервуара целесообразно изучать на примере колебательного движения среды внутри кругового цилиндра. Рассматриваемые здесь особенности движения сохраняют свою общность и полную аналогию.

**Постановка задачи моделирования.** В основу модели положено предположение о том, что поведение массы гранул, находящихся под действием колебаний, аналогично поведению газа. Решение задачи нахождения зависимости поля скоростей элементарного объема гранул рабочей среды, а также его плотности и давления, от координат и времени необходимо искать с помощью уравнений Навье-Стокса, уравнений неразрывности и уравнений состояния газа. Однако, поиск решения этих уравнений даже при простых начальных и граничных условиях встречает непреодолимые математические трудности. Поэтому в данном случае пренебрегаем изменением плотности, гравитационным воздействием и конвективным ускорением. Все перечисленные упрощения согласуются с результатами экспериментальных исследований процесса виброобработки [1, 2, 11].

*Исходные уравнения и граничные условия движения рабочей среды.* Исходя из гипотезы прилипания [12], принимаем, что элементарный объем рабочей среды, находящейся на внутренней поверхности цилиндра, имеет скорость, равную скорости этой поверхности. Тогда, скорости гранул среды на границе цилиндра определяются следующим образом:  $V_{O\varphi} = -A\omega \sin(\omega t - \varphi)$ ;  $V_{Or} = -A\omega \cos(\omega t - \varphi)$  (рис. 3). Компоненты скорости элементарного объема гранул представлены в цилиндрических координатах  $o\varphi$  и  $or$ . Ось  $oz$  расположена перпендикулярно плоскостям,  $i_r$  и  $i_\varphi$  – единичные векторы, направленные по радиусу цилиндра и тангенциально ему (рис. 3).

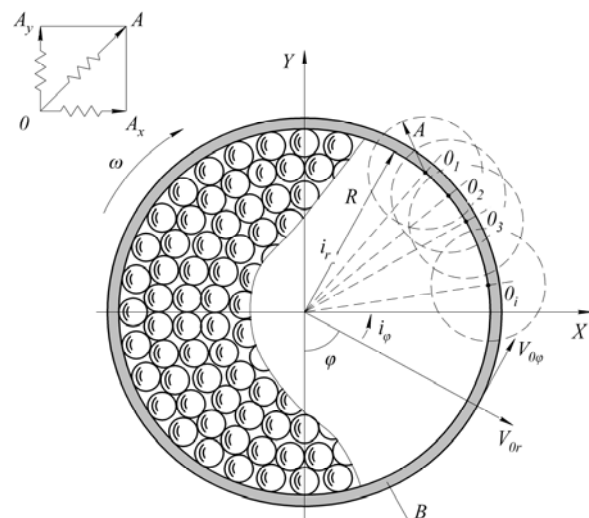


Рис. 3. Радиальная и тангенциальная составляющие скорости движения элементарного объема гранул рабочей среды внутри цилиндра

*Решение упрощенных уравнений Навье-Стокса.*  
Исходя из сказанного выше, можно записать следующие упрощенные уравнения Навье-Стокса [13] в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_\varphi}{\partial t} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} \right). \quad (4)$$

Здесь  $V_r$  и  $V_\varphi$  – скорости элементарного объема рабочей среды, направленные, соответственно, вдоль единичных векторов  $i_r$  и  $i_\varphi$ .

Для решения уравнений (3) и (4) использовался метод разделения переменных [14]. Были получены три типа уравнений, одинаковых для обоих компонент скорости, которые определяли радиальную  $H(r)$ , тангенциальную  $g(\varphi)$  и временную  $a(t)$  составляющие скоростей  $V_r$  и  $V_\varphi$  элементарного объема псевдо-газа из абразивных гранул:

$$x^2 \frac{d^2 H}{dx^2} + x \frac{dH}{dx} + H(x^2 - l) = \frac{lc}{\rho k}; \quad \frac{1}{g} \frac{d^2 g}{d\varphi^2} = l; \quad a = Ae^{\pm kt}. \quad (5)$$

Константы, определяются из граничных условий –  $k = i\omega$ ,  $l = -1$ . Переменная  $x$ , введенная в ходе преобразований может иметь два значения –  $w = \sqrt{\frac{k}{\nu}} r$ ,  $z = i\sqrt{\frac{k}{\nu}} r$  в зависимости от знака перед постоянной  $k$  в выражении для  $a(t)$ . Уравнение для  $H(r)$  является неоднородным дифференциальным уравнением Бесселя, решение которого имеет вид [15]:

$$H(x) = \frac{\pi}{2} Y_\nu(x) \int x J_\nu(x) m dx - \frac{\pi}{2} J_\nu(x) \int x Y_\nu(x) m dx. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} H(z) = -\frac{\pi}{2} \frac{c_1 c_2 c_3}{\rho \omega} \left\{ H_1^*(z) + iH_2^*(z) \right\}, \\ H(w) = \frac{\pi}{2} \frac{c_1 c_2 c_3}{\rho \omega} \left\{ H_1^*(w) + iH_2^*(w) \right\}. \end{cases} \quad (7)$$

Окончательное решение уравнений (3) и (4) с граничными условиями  $V_{0\varphi} = -A\omega \sin(\omega t - \varphi)$ ;  $V_{0r} = -A\omega \cos(\omega t - \varphi)$  имеет вид:

$$V_r(t, r, \varphi) = \left( F_1^J(r^*) (D_r - B_r) + \frac{\pi}{2} R\omega A^2 \left( H_1^*(w) - H_1^*(z) \right) \right) \cos(\omega t - \varphi). \quad (8)$$

$$V_\varphi(t, r, \varphi) = -\left( F_2^J(r^*) (D_\varphi + B_\varphi) + \frac{\pi}{2} R\omega A^2 \left( H_2^*(w) + H_2^*(z) \right) \right) \sin(\omega t - \varphi). \quad (9)$$

Коэффициенты  $B_\varphi$ ,  $D_\varphi$ ,  $B_r$ ,  $D_r$  входящие в выражения (8) и (9), определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} B_\varphi &= \frac{A\omega \left( 1 - 2RA + \pi RAH_2^*(Z) \right)}{2F_2^J(R^*)}; \\ D_\varphi &= \frac{A\omega \left( 1 + 2RA - \pi RAH_2^*(W) \right)}{2F_2^J(R^*)}; \\ B_r &= \frac{A\omega \left( 1 + 2RA - \pi RAH_1^*(Z) \right)}{2F_1^J(R^*)}; \\ D_r &= \frac{A\omega \left( -1 + 2RA - \pi RAH_1^*(W) \right)}{2F_1^J(R^*)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для граничных условий  $V_{0r}^1 = -A\omega \sin(\omega t - \varphi)$ ,  $V_{0\varphi}^1 = -A\omega \cos(\omega t - \varphi)$  решение несколько видоизменяется: здесь  $H_1^*(Z)$ ;  $H_1^*(W)$ ;  $H_2^*(Z)$ ;  $H_2^*(W)$ ;  $F_1^J(R^*)$ ;  $F_2^J(R^*)$  представляют собой значения этих функций при  $r = R$ ,  $r^* = r\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$  (рис. 4). Поведение перечисленных функций в зависимости от безразмерного радиуса –  $r^*$ , а также зависимости  $V_r(t, r, \varphi)$  и  $V_\varphi(t, r, \varphi)$  при  $\varphi = 0$  показаны графически (рис. 5, 6).

Графическая зависимость для  $V_r(t, r, \varphi)$  показывает, что радиальная  $V_r(r^*)$  компонента скорости движения гранул описывается только вдоль временной оси  $T = 2\pi/\omega$ .

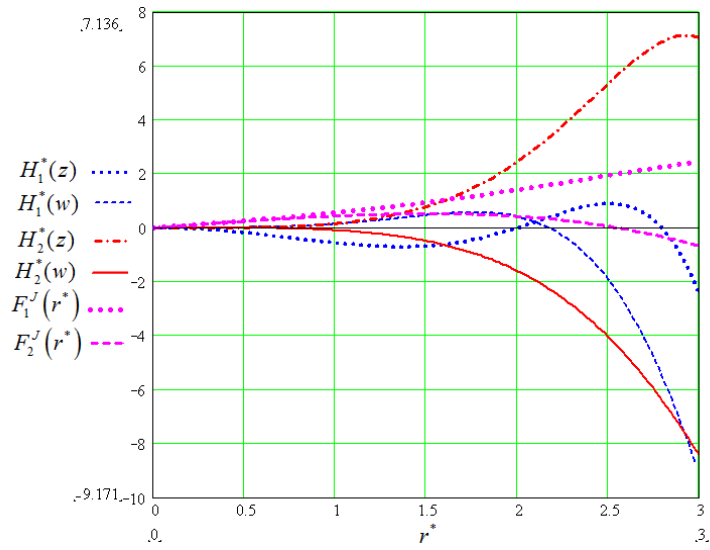


Рис. 4. Зависимость функций  $H_1^*(Z)$ ;  $H_1^*(W)$ ;  $H_2^*(Z)$ ;  $H_2^*(W)$ ;  $F_1^J(R^*)$ ;  $F_2^J(R^*)$

от величины безразмерного радиуса  $r^*$

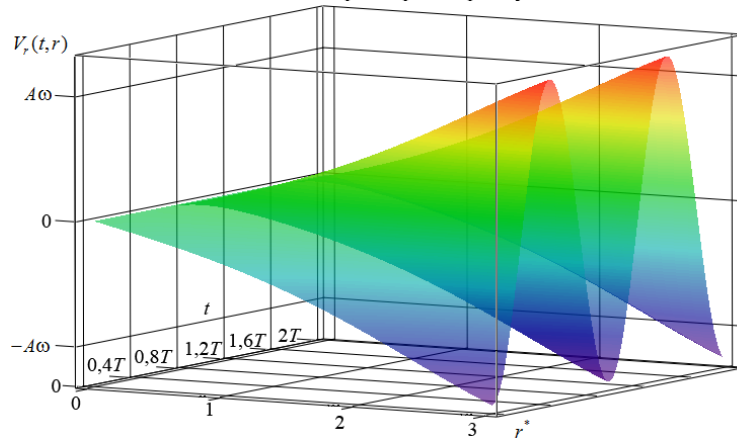


Рис. 5. Зависимость  $V_r(t, r, \varphi)$  радиальной составляющей скорости движения гранул среды внутри колеблющегося цилиндра от его радиуса и периода колебания  $T = 2\pi/\omega$

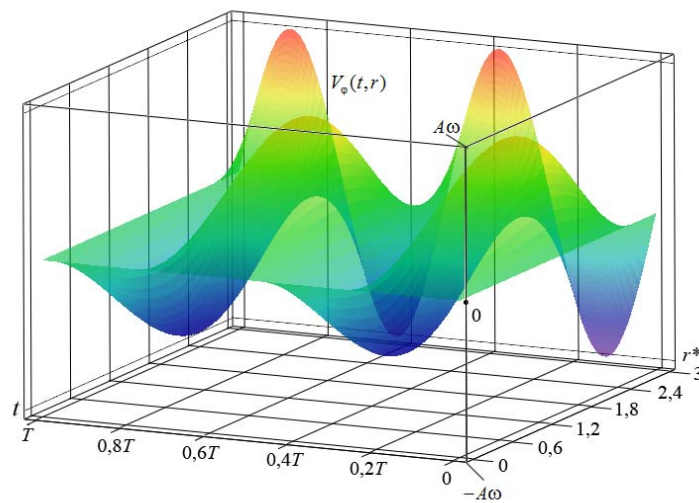


Рис. 6. Зависимость  $V_\varphi(t, r, \varphi)$  тангенциальной составляющей скорости движения гранул среды внутри колеблющегося цилиндра от его радиуса и периода колебания  $T = 2\pi/\omega$



Графическая зависимость для  $V_{\varphi}(t, r, \varphi)$  описывает колебательное движение рабочей среды, как вдоль временной оси, так и в радиальном направлении. Такое поведение, в циркуляционном движении колеблющейся рабочей среды весьма характерно для волновых процессов. Из волновых свойств  $V_{\varphi}(t, r, \varphi)$  можно сделать следующие выводы:

– волновой характер поведения  $V_{\varphi}(r^*)$

означает, что тангенциальная составляющая скорости движения гранул среды будет иметь различное направление при изменении удаления от рабочей поверхности цилиндра или от его оси;

– на кривой  $V_{\varphi}(r^*)$  можно выделить три участка, которые характеризуют изменение ее поведения по мере удаления от рабочей поверхности цилиндра к его центральной части. На первом отрезке, когда  $2,6 \leq r^* \leq 3$ , модуль функции убывает от  $A\omega$  до нуля, на втором отрезке, когда  $1,5 \leq r^* \leq 2,6$ , модуль функции растет от нуля до  $\approx 0,8A\omega$ , на третьем участке  $V_{\varphi}(r^*)$  вновь стремится к нулю.

Следовательно, поведение тангенциальной  $V_{\varphi}(r^*)$  составляющей скорости движения гранул среды означает, что изменяя радиус днища резервуара вибростанка, можно обеспечить, как увеличение модуля тангенциальной составляющей скорости по мере удаления от рабочей поверхности резервуара к его центру, так и его снижение. Иными словами, существует возможность оптимизировать конструктивные параметры резервуара вибростанка применительно к требуемому технологическому результату обработки. Основным фактором определения конструктивных параметров является величина  $\tilde{L} = \sqrt{\frac{V}{\omega}}$ , имеющая размерность длины.

Кроме того, увеличение тангенциальной  $V_{\varphi}(r^*)$  составляющей скорости движения гранул рабочей среды носит характер кумуляции кинетической энергии тангенциального потока. Такие физические эффекты целесообразно использовать в новых разновидностях процессов виброобработки, связанных с использованием различных схем энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали [5, 16].

**Выводы.** Таким образом, проведенные исследования позволили установить характерные особенности динамики рабочей среды в технологической системе. При этом выявлено, что основными физическими элементами в

виброобработке являются процессы микрорезания и упругопластического деформирования. Также определен безразмерный характер виброобработки и предложена ее механо-физико-химическая модель при разрушении поверхности детали в среде колеблющихся гранул свободной абразивной среды.

В результате экспериментальных обработок изделий из различных металлов установлены величины съема металла и шероховатости поверхности для операций виброобработки, а также область рациональных параметров технологического процесса для их достижения.

Проведенное описание кинематики виброкипящей гранулированной среды при обработке в колеблющемся резервуаре позволяет рассчитать динамику рабочей среды в резервуаре с учетом «отрыва» среды от поверхности резервуара и последующей их «встречи». Для этого необходимо разложить в ряд Фурье периодическое негармоническое изменение скорости гранул граничного слоя среды, контактирующего с рабочей поверхностью резервуара. Тогда новое решение будет определяться суммой решений, найденных для случая гармонического изменения скорости гранул граничного слоя, принятых со своими частотами и весовыми коэффициентами.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
2. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах: моногр. / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов и др. – К.: Вища школа, 1975. – 188 с.
3. Развитие вопросов кинематики и динамики процессов отделочно-зачистной обработки в колеблющемся резервуаре / Мицык А.В., Фадеев В.А., Федорович В.А. // Резание и инструмент в технологических системах: зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – Вип. 82. – С. 171 – 182.
4. Mityuk A.V., Fedorovich V.A., Mamalis A.G., Kundrak J Development of Modular Machine Design and Technologies of Dynamic Action for Finishing-Grinding Treatment by an Oscillating Abrasive Medium. Journal of Machining and Forming Technologies. 2015. 7, 1-10.
5. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи и др.; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с.
6. Бабичев А.П. Наладка и эксплуатация станков для вибрационной обработки / А.П. Бабичев, Т.Н. Рысева, В.А. Самодуров, М.А. Тамаркин. – М.: Машиностроение, 1988. – 64 с.
7. Мицык А.В. Повышение эффективности обработки крупногабаритных плоскостных изделий активизацией движения рабочей среды в колеблющихся «U» – образных контейнерах: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Мицык Андрей Владимирович. – Харьков, 2008. – 331 с.

8. Новая разновидность способа отделочно-зачистной обработки и агрегатированный вибростанок вибрационного и центробежного динамического воздействия / Мицык А.В., Федорович В.А. // Резание и инструмент в технологических системах: зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», 2012. – Вип. 86. – С. 96 – 102.
9. Аналітика, коментарії і класифікація технологій отделочно-зачистної виброобработки, созданных комбинированием различных схем энергетического воздействия / Мицык А.В., Федорович В.А. // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – Вип. 11. – С. 175 – 189.
10. Мицык А.В. Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали / А.В. Мицык, В.А. Федорович // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2011. – № 6 (83). – С. 26 – 34.
11. Мицык А.В., Федорович В.А. Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей общемашиностроительного применения. // Вісник НТУ «ХП». Серія Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків НТУ «ХП». – 2012. – № 47 (953). – С. 226 – 233.
12. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2000. – 615 p.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 5-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.
14. Tun Muint-U, Lokenath Debnath. Linear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers. Boston: Birkhäuser, 2007. – 778 p.
15. Watson G.K. A treatise on the theory of Bessel Functions. England: Cambridge University Press, 1995. – 794 p.
16. Эффективность новых разновидностей способа вибрационной обработки деталей / Мицык А.В., Федорович В.А., Фадеев В.А. // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», 2012. – Вип. 7. – С. 74 – 81.
- red. A.P. Babicheva. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DG TU, 2010. – 289 s.
6. Babichev A.P. Naladka i jekspluatacija stankov dlja vibracionnoj obrabotki / A.P. Babichev, T.N. Ryseva, V.A. Samodurov, M.A. Tamarkin. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 64 s.
7. Mitsyk A.V. Povyshenie jeffektivnosti obrabotki krupnogabaritnyh ploskostnyh izdelij aktivizaciej dvizhenija rabochej sredy v kolebljushhihsja «U» – obraznyh kontejnerah: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.03.01 / Mitsyk Andrej Vladimirovich. – Kharkov, 2008. – 331 s.
8. Novaja raznovidnost' sposoba otdelechno-zachistnoj obrabotki i agregatirovannyj vibrastanok vibracionnogo i centrobezhnogo dinamicheskogo vozdejstvija / Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: zb. nauk. prac'. – K.: NTU «KPI», 2012. – Vip. 86. – S. 96 – 102.
9. Analitika, komentarii i klassifikacija tehnologij otdelechno-zachistnoj vibroobrabotki, sozdannyh kombinirovaniem razlichnyh shem jenergeticheskogo vozdejstvija / Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – K.: NTU «KPI», 2016. – Vip. 11. – S. 175 – 189.
10. Mitsyk A.V. Puti intensifikacii vibracionnoj otdelechno-zachistnoj obrabotki kombinirovaniem shem jenergeticheskikh vozdejstvij na rabochuju srediu i detali / A.V. Mitsyk, V.A. Fedorovich // Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija. – 2011. – № 6 (83). – S. 26 – 34.
11. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Razvitie novyh tehnologij vibracionnoj otdelechno-zachistnoj i uprochnjajushhej obrabotki detalej obshhemashinostroitel'nogo primenenija. // Visnik NTU «KPI». Serija Novi rishennja v suchasni tehnologijah. – Kharkov NTU «KPI». – 2012. – № 47 (953). – S. 226 – 233.
12. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2000. – 615 p.
13. Landau L.D., Lifshic E.M. Teoreticheskaja fizika: Uchebnoe posobie. V 10 t. T. VI. Gidrodinamika. – 5-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.
14. Tun Muint-U, Lokenath Debnath. Linear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers. Boston: Birkhäuser, 2007. – 778 p.
15. Watson G.K. A treatise on the theory of Bessel Functions. England: Cambridge University Press, 1995. – 794 p.
16. Jeffektivnost' novyh raznovidnostej sposoba vibracionnoj obrabotki detalej / Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Fadeev V.A. // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – K.: NTU «KPI», 2012. – Vip. 7. – S. 74 – 81.

#### References

1. Babichev A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DG TU, 2008. – 694 s.
2. Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibrirujushhih rezervuarah: monogr. / I.N. Kartashov, M.E. Shainskij, V.A. Vlasov i dr. – K.: Vishha shkola, 1975. – 188 s.
3. Razvitie voprosov kinematiki i dinamiki processov otdelechno-zachistnoj obrabotki v kolebljushhemsja rezervuare / Mitsyk A.V., Fadeev V.A., Fedorovich V.A. // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: zb. nauk. prac'. – K.: NTU «KPI», 2012. – Vip. 82. – S. 171 – 182.
4. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Mamalis A.G., Kundrak J Development of Modular Machine Design and Technologies of Dynamic Action for Finishing-Grinding Treatment by an Oscillating Abrasive Medium. Journal of Machining and Forming Technologies. 2015. 7, 1-10.
5. Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacijah otdelechno-zachistnoj obrabotki detalej (ochistka, mojka, udalenie obloja i zausencev, obrabotka kromok) / A.P. Babichev, P.D. Motrenko, L.K. Gillespi i dr.; pod

#### Мицык А.В. Наукові основи визначення та математичне моделювання критеріїв операцій виброобработки та область раціональних параметрів технологічного процесу для їх досягнення

*Дана фізична сутність процесу виброобработки, а також особливості механіки робочого середовища і технологічні можливості виброобработки. Вказані відмітні ознаки виброобработки, отримана механо-фізико-хімічна модель руйнування поверхні деталі. Наведено критерії операції виброобработки та аналітичні вирази для їх розрахунку. Дано технологічні рекомендації щодо вибору параметрів для різних операцій виброобработки. Проведено математичне моделювання кінематики робочого середовища. Наведено вихідні рівняння і граничні умови руху робочого середовища. Запропоновано рішення спрощених рівнянь Нав'є-Стокса.*

**Ключові слова:** операції віброобробки, робоче середовище, зйом металу, шорсткість поверхні, циркуляція середовища, механо-фізико-хімічна модель, критерії операцій, схеми енергетичного впливу, рівняння Нав'є-Стокса.

**Mitsyk A.V. Scientific basis for determining the criteria and mathematical simulation of vibration treatment operations and the field of rationale parameters of technological process to achieve them**

*A physical nature of vibration treatment process as well as the special features of the mechanics of working medium and technological possibilities of vibration treatment are described. It is established that as a result of mutual relative movement and the pressure of medium granules and processed parts the microcutting processes and the elastoplastic deformation take place. It ensures removal of the defective metal layer as well as reducing the surface roughness of the parts. The distinctive indications of vibration treatment are shown, mechanical and physical-chemical model of the part surface fracture is obtained. The vibration treatment operations criteria and the analytic expressions for their calculation are given. The technological recommendations on*

*the choice of parameters for different vibration treatment operations are given. The mathematical simulation of working medium kinematics is conducted. The original equations and boundary conditions of working medium movement are presented. The solutions of simplified Navier-Stokes equations are offered.*

**Key words:** vibration treatment operations; working medium; metal removal; surface roughness; medium circulation; mechanical and physical-chemical model; criteria of operations; the schemes of energy action; Navier-Stokes equations.

**Міцик Андрій Володимирович** – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), [an.mitsyk@gmail.com](mailto:an.mitsyk@gmail.com)

Рецензент: д.т.н., проф. **Носко П.Л.**

Стаття подана 17.09.2016