

УДК 621.9.048.6

Е.Ю. КРУПЕНЯ, В.А. ЛЕБЕДЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРООТДЕЛКИ ДЕТАЛИ СРЕДАМИ ОРГАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований финишной отделки поверхностей деталей средами органического происхождения. Предложены модели по оценке качества поверхности и производительности процесса, расширяющие технологические возможности вибрационной отделочной обработки деталей с использованием данного вида обрабатывающих сред.

Ключевые слова: *вибрационная обработка, среда органического происхождения, шероховатость, микронеровность поверхности, микропластическая деформация, микросглаживание.*

Введение. Формируемая в процессе отделочных операций микрогеометрия поверхности деталей во многом определяет эксплуатационные свойства деталей. Кроме того, от степени подготовки поверхности на стадии механической финишной обработки зависит качество наносимых на них антикоррозионных и других специальных покрытий. В ряде случаев, в частности, при обработке медицинских инструментов, возникает необходимость улучшения качества уже сформированного на поверхности покрытия, нанесенного гальваническим или электрохимическим способами. Для решения этих задач в машиностроительной практике применяются методы отделочной упрочняющей обработки, специально созданными для этих целей инструментами или обрабатывающими средами.

Вместе с тем, как показывают результаты проведенных экспериментальных исследований (рис.1), для финишной отделки высокоточных деталей, гидроаппаратуры, электротехнических изделий, медицинских инструментов, изделий бытового назначения могут быть использованы обрабатывающие среды органического происхождения такие, как косточки плодовых деревьев (вишня, черешня, абрикос, алыча), деревянные кубики различных по твердости пород деревьев, измельченная кора ореха, технологические возможности которых на сегодня мало изучены. Применение подобного типа обрабатывающих сред позволяет расширить номенклатуру способов финишной отделки деталей.

Поэтому целью настоящих исследований являлось моделирование процесса обработки деталей средами органического происхождения, в частности, косточками вишневых деревьев в условиях виброобработки как одного из наиболее производительных и эффективных методов окончательной обработки деталей. С точки зрения физико-механических свойств среды на органической связке обладают меньшей массой, но большей прочностью и износостойкостью.

Решение задачи. Формирование качества поверхности обрабатываемой детали происходит путём многократного и всестороннего воздействия частиц обрабатывающей среды на обрабатываемую поверхность при их взаимном соударении и скольжении, вызванных действием направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере, в которой размещены обрабатывающие среды и детали.

Особенность виброотделочной обработки деталей органическими средами заключается в том, что из-за отсутствия у них абразивной составляющей улучшение качества поверхности детали обеспечивается, главным образом, в результате разрушения оксидной плёнки, образовавшейся на поверхности микронеровности и последующей их микропластической деформации. Одним из основных технологических факторов виброударной отделочной обработки является влияние ее на шероховатость поверхности. Формирование улучшенного, по сравнению с предыдущей обработкой, микрорельефа поверхности происходит путем многократного ударно-импульсного взаимодействия частиц обрабатывающей среды с обрабатываемой поверхностью. В результате нанесения на обрабатываемую поверхность большого числа ударов в различных направлениях и

их микропластического деформирования происходит постепенное скругление гребешков микронеровностей, обуславливающее эффект сглаживания поверхности, за определенный промежуток времени, после чего ее уменьшение не наблюдается.

Под производительностью вибрационной отделочной обработки косточковыми органическими средами следует понимать интенсивность достижения заданных конечных параметров обрабатываемой поверхности в результате её микросглаживания. Если предположить, что все микронеровности обрабатываемой поверхности в процессе виброотделки детали косточковыми органическими средами подвергаются одинаковому воздействию, то в качестве основополагающей модели по оценке изменения шероховатости поверхности обрабатываемой детали может быть принята следующая модель:

$$R_{a_i} = R_{a_{исх}} - \sum_{i=1}^{i=N} \delta_i, \quad (1)$$

где $R_{a_{исх}}$ – исходная шероховатость поверхности обрабатываемой детали; δ_i – величина микропластической деформации микрогребешка за один акт силового воздействия на него частиц обрабатывающей среды; i – количество актов силового взаимодействия частиц с микрогребешком.

Установлено, что с каждым последующим взаимодействием частиц с обрабатываемой поверхностью величина микропластической деформации микронеровностей снижается в 1,34 раза [1]:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\delta_2}{\delta_3} = \dots = \frac{\delta_{i-1}}{\delta_i} = r,$$

где $\delta_1, \delta_2, \delta_i$ – величина микропластической деформации при одном, двух и последующих взаимодействиях частиц с микрогребешком.

Таким образом, суммарную величину микропластической деформации за время обработки t можно выразить следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{i=N} \delta_i = \delta_1 \left(1 + \frac{1}{r} + \frac{1}{r^2} + \dots + \frac{1}{r^i} \right).$$

Выражение в скобках представляет собой геометрическую прогрессию, сумма которой равна

$$S_m = \frac{r - \left(\frac{1}{r}\right)^{i-1}}{r - 1}, \quad (2)$$

С учетом (2) выражение изменения шероховатости поверхности при виброотделке косточковыми органическими средами примет вид:

$$R_{a_i} = R_{a_{исх}} - \delta_1 \frac{r - \left(\frac{1}{r}\right)^{i-1}}{r - 1}, \quad (3)$$

где δ_1 – величина микропластической деформации микрогребешка в результате первичного силового воздействия частиц на микрогребешок обрабатываемой поверхности.

Для применения предложенной модели необходимо теоретическое экспериментальное обоснование величины микропластической деформации в точке единичного контакта частиц с обрабатываемой поверхностью при первом акте силового воздействия. Микропластическая деформация протекает на вершинах микронеровностей, сформированных на поверхностях или в процессе предварительной механической обработки (шлифование, виброабразивная отделка или нанесение покрытия) и обладающих в силу геометрической остроугольной формы ослабленными прочностными свойствами по сравнению с их основанием. В результате силового воздействия

частиц на микронеровности обеспечивается эффект микросглаживания при обработке косточковыми органическими средами, имеющими при своём малом удельном весе относительно высокую прочность. По физической сущности процесс микропластической деформации аналогичен процессам макропластической деформации, протекающих при виброударной обработке и получивших широкое распространение в отделочно-упрочняющих технологиях.

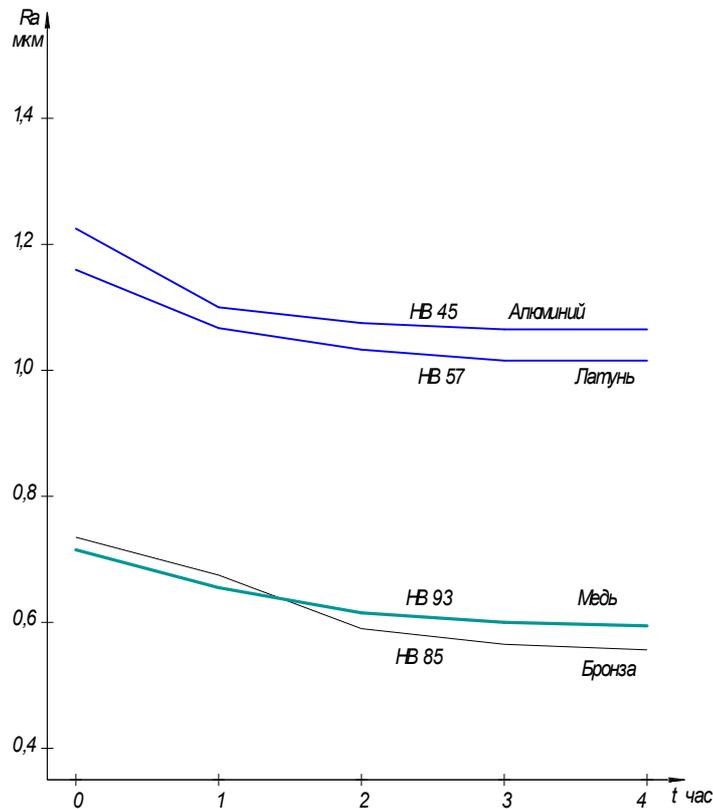


Рис.1. Изменение шероховатости поверхности обрабатываемой детали при виброобработке средами органического происхождения (обрабатывающая среда – косточки вишни): $A = 3$ мм, $f = 35$ Гц

Рассчитывая удельную величину микродеформации за один энергоимпульс, рассмотрим зависимость [2,12] для оценки изменения шероховатости в процессе виброударной обработки, преобразовав ее в вид:

$$\delta = K_{cp} \cdot K_{Ra} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mathcal{E}}{\pi \cdot HB \cdot D}}, \quad (4)$$

где K_{cp} – коэффициент, учитывающий изменение физико-биологических свойств обрабатываемой органической среды (влажность, усыхание ядра косточки) от периода созревания до момента ее использования и изменяется от 1 до 0,8 (при длительном её хранении); K_{Ra} – коэффициент, учитывающий геометрические размеры микропрофиля обрабатываемой поверхности, сформированной на предшествующих операциях или при механической обработке (полирование, виброабразивная обработка), или после нанесения покрытий; \mathcal{E} – энергия соударения частиц обрабатываемой среды с обрабатываемой поверхностью; HB – твёрдость обрабатываемой поверхности; D – средний диаметр частиц обрабатываемой среды.

Как следует из формулы (4), в качестве основных факторов, обуславливающих величину микропластической деформации и, как следствие, микросглаживание поверхности, выступают гранулометрические характеристики частиц обрабатывающей среды, геометрические и физико-механические свойства микронеровностей обрабатываемой поверхности, а также энергия соударения. Совокупность этих факторов в целом раскрывает физическую сущность процесса обработки деталей косточковыми органическими средами.

Величину K_{Ra} наиболее целесообразно оценивать по высоте микронеровностей обрабатываемой поверхности относительно профиля предельнодостижимого качества поверхности методами отделочной обработки деталей, используя следующее соотношение:

$$K_{Ra} = \frac{R_{a_{\text{исх}}} - Ra_{10}}{R_{a_{\text{исх}}}},$$

где Ra_{10} – высота микронеровностей поверхности, обработанных по 10-му качеству точности.

Для определения энергии соударения частиц пограничного слоя органической косточковой обрабатывающей среды с поверхностью обрабатываемой детали воспользуемся формулой, предложенной в работах [2,3]:

$$\mathcal{E} = 2 m_{\Sigma} (A \cdot \omega \cdot \cos \alpha)^2 (1 - R^2) \cdot K_d, \quad (5)$$

где m_{Σ} – приведенная масса соударяющихся с обрабатываемой поверхностью частиц обрабатывающей среды; R – коэффициент восстановления скорости соударений; $\cos \alpha$ – угол соударения частиц в точке контакта; K_d – коэффициент, характеризующий динамическое состояние обрабатывающей органической среды; A – амплитуда колебаний виброкамеры; ω – угловая частота колебаний виброкамеры.

Анализ применения формулы (5) для оценки энергетического состояния частиц обрабатывающей органической среды показал, что она имеет один существенный недостаток, а именно, отсутствие пороговой амплитуды колебаний, ниже которой движение органической среды и, естественно, процесс микросглаживания поверхности отсутствует. Результаты экспериментальных исследований виброабразивной и виброударной обработки [2, 3] показывают, что пороговая амплитуда зависит от частоты вибрации, причем с ростом частоты она снижается. Обоснование этого явления установлено в работах [4, 5], в которых показано, что движение частиц, находящихся на шероховатой вибрирующей поверхности, в режиме "с подбрасыванием" (а именно такой режим реализуется на вибростанках), может начаться при величине виброперегрузки:

$$\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2}{g} \geq 1, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения.

Из (6) вытекает зависимость для определения пороговой амплитуды в функции от частоты колебаний f обрабатывающей среды:

$$A_0 \cdot \omega^2 \geq g \Rightarrow A_0 \approx \frac{g}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2}. \quad (7)$$

Таким образом, в формуле (5) целесообразно ввести пороговую амплитуду, а амплитудную зависимость записать в виде $A - A_0$, где $A > A_0$. Аналогично амплитуде, более корректно ввести и пороговую частоту, начиная с которой обрабатывающая органическая среда может прийти в движение, представив частотную зависимость как:

$$\omega - \omega_0 = 2\pi (f - f_0),$$

где $\omega = 2\pi f$; $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Экспериментальные данные, представленные в работах [2, 3, 6], свидетельствуют, что для большинства вибростанков с циркуляционным характером движения величину f_0 находим в интервале 10-15 Гц.

На основании вышеизложенных рассуждений, формула (5) для определения энергии соударения, включающая амплитудную и частотную зависимости, будет иметь вид:

$$\mathcal{E} = 8 \pi^2 m_{\Sigma} [(A - A_0)^n (f - f_0)^{\beta} \cdot \cos \alpha]^2 (1 - R^2) \cdot K_{\sigma}, \quad (8)$$

где β , n – коэффициенты, корректирующие влияния частоты и амплитуды на энергетическое состояние обрабатываемой среды.

Кроме того, из работ [2, 3, 6] следует, что в динамическом отношении обрабатываемая среда представляет собой многомассовую, дискретную, виброударную систему с распределёнными и импульсивно изменяющимися параметрами. В связи со сложностью процессов отрыва и соударения обрабатываемой среды с виброконтейнером и деталью их массовые характеристики, как правило, исследуются экспериментально. На основе теоретических и экспериментальных исследований в работах [2, 3], предложено уравнение, приближенно определяющее значение приведенной массы m_{Σ} группы частиц, участвующих в такте соударения с поверхностью детали, которое для случая обработки органическими средами представим в виде:

$$m_{\Sigma} = m_i \frac{l_0}{l_q \cdot R}, \quad (9)$$

где m_i – масса одной частицы; l_0 – динамический зазор между стенками рабочей камеры и прилегающими слоями обрабатываемой среды, который приблизительно равен величине амплитуды колебаний; l_q – динамический зазор между частицами обрабатываемой среды.

Наличие динамических зазоров и их зависимость от параметров колебаний является характерной особенностью виброотделочных технологических систем. Величина зазора существенно влияет на производительность и равномерность обработки. Отклонения значений динамических зазоров от оптимальных снижает производительность обработки.

Динамические зазоры между стенками рабочей камеры и прилегающими слоями обрабатываемой среды зависят от динамического состояния среды и, как показано на рис.2 [3], имеют зависимость от амплитуды для свободного состояния обрабатываемой среды, близкую к линейной:

$$l_0 = K_d \cdot A, \quad (10)$$

где K_d – коэффициент, характеризующий динамическое состояние обрабатываемой среды, который изменяется от 0,9 при свободном состоянии до 0 при большом сжатии среды.

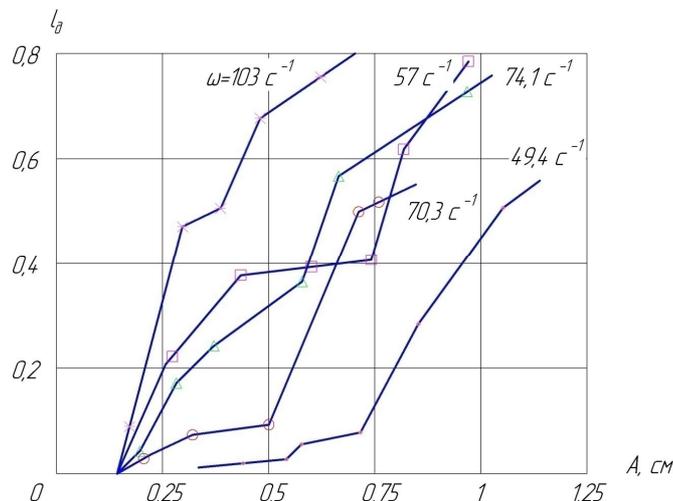


Рис.2. Зависимость безразмерного динамического зазора l_0 от амплитуды колебаний контейнера

Следует отметить, что в процессе виброколебания обрабатываемой среды между частицами образуются динамические зазоры, вызывая её разрыхление, величину которого можно оценить коэффициентом объемного разрыхления:

$$K_g = \frac{g_{pc}}{g_0}, \quad (11)$$

где g_0, g_{pc} – объемы рабочей среды, занимаемые при отсутствии колебаний виброконтейнера и при его колебаниях, с ускорением выше ускорения свободного падения.

При $K_g = 1$, когда разрыхление в обрабатываемой среде отсутствует, то динамического зазора между частицами нет. При динамическом разрыхлении ($K_g > 1$) появляются зазоры, величину которых, согласно [2], приближенно можно определить из соотношения:

$$l_q = 0.25 \cdot D \cdot (K_g - 1). \quad (12)$$

В работах по теории виброударных систем различного технологического назначения и теории удара известно, что коэффициент восстановления скорости соударения R интегрально отражает напряженно-деформационные процессы. Данный коэффициент R необходим для обеспечения требуемой точности расчета, понимания физической сущности физико-механических процессов, которые происходят на границе ударного контакта между обрабатываемой поверхностью детали и гранулами органической среды.

Значение коэффициента R для косточковых органических сред определяли из известной зависимости, предложенной [2, 4, 5]:

$$R = \sqrt{\frac{h_+}{h_-}}, \quad (13)$$

где h_+ и h_- - соответственно высота отскока и падения.

На основании проведенных опытов установлено, что для фруктовых косточковых деревьев (вишня, черешня) $R = 0,14$.

Таким образом, динамические свойства обрабатываемой среды, такие как разрыхление, динамические зазоры, коэффициент восстановления, оказывают влияние на величину приведенной массы частиц, участвующих в соударении с обрабатываемой поверхностью детали.

С учетом вышеизложенных исследований формула для оценки удельной величины микропластической деформации, обуславливающей микросглаживание микронеровности поверхности за один энергоимпульс при первичном воздействии частиц, примет вид:

$$\delta_i = K_{cp} \cdot K_{Ra} \cdot K_D \cdot (A - A_0)^n \cdot (f - f_0)^\beta \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot m_\Sigma \cdot (1 - R^2)}{HB \cdot D}}. \quad (14)$$

В работах [2, 3, 6] установлено, что увеличение объема загрузки приводит к интенсификации обработки, которую авторы связывают с двумя факторами:

- 1) с увеличением интенсивности циркуляционного движения массы загрузки в камере;
- 2) с ростом внутренних напряжений, обусловленных в значительной степени гидростатическими силами при увеличении высоты столба загрузки среды.

Эти утверждения получили доказательство в работе [7], в которой показано, что при стремлении циркуляционного эллипса к окружности (сближение малой и большой полуосей) движение среды наименее энергозатратно из-за минимальных потерь на внутреннее межслойное трение, что обуславливает высокую виброподвижность среды.

Кроме того, при интенсивной циркуляции в отсутствии застойных зон и сводов характер изменения давления по глубине близок к гидростатическому. В силу указанных факторов предлагается производить деление камеры на зоны по признаку интенсивности обработки [2,7,8].

В результате экспериментальных и теоретических исследований [6] выявлено, что условиями образования стационарного циркуляционного движения обрабатываемой среды по слабо эксцентричным (близким к окружности) эллипсам является условие виброобработки в виброкамерах, характеризующиеся соотношениями:

$$\frac{H}{L} \approx 1, \quad \frac{H}{D} > 6; \quad \frac{(A \cdot \omega)^2}{g \cdot H} < 0,5, \quad (15)$$

где H – высота загрузки; L – ширина сечения камеры.

Кроме того, в работе [6] показано, что в условиях воздействия на поверхность деталей стационарного потока обрабатываемой среды величина удельной объемной интенсивности обработки пропорциональна плотности потока энергии среды, взаимодействующей с поверхностью детали. Для случаев размещения детали в глубине потока, т.е. при наличии гидростатической составляющей напряжений, установлено, что плотность потока энергии равна произведению средней скорости среды V на гидростатическое давление P . Это позволяет выразить удельную величину микросглаживания микронеровностей отношением плотности потока энергии среды к постоянной величине в виде Σ , назвав её модулем микропластической деформации [6]:

$$\delta^* = \frac{P \cdot V}{\Sigma}. \quad (16)$$

Величина Σ зависит от природы органической среды и её свойств, она является неким комплексным параметром, характеризующим микромеханику микродеформации в данной трибо-системе.

Поскольку модуль Σ является константой, не зависящей от динамического состояния среды, то его целесообразно идентифицировать с коэффициентом $K_{ср}$, характеризующим свойства органической среды в формуле (14).

Выразим давление через высоту загрузки H в виде:

$$\delta^* = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot V}{\Sigma}, \quad (17)$$

где ρ – плотность органической среды.

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (18)$$

$\rho = 0,52 \text{ кг/м}^3$ (среда органического происхождения «косточка вишни»).

Принимая во внимание, что рабочая камера не является сильно вытянутой или сплюснутой вдоль оси, выразим высоту загрузки через объем:

$$\delta^* = \frac{\rho \cdot g \cdot V}{\Sigma} \cdot \sqrt[3]{\theta}. \quad (19)$$

Учитывая результаты исследований, представленных в работе [5] и на рис.2, что скорость циркуляционного движения среды внутри U образной камеры определяется соотношением

$$V = \frac{A \cdot f}{2}, \quad (20)$$

преобразуем формулу (19) и получим:

$$\delta^* = \pi \cdot g \cdot \frac{\rho}{\Sigma} \cdot A \cdot f \cdot \sqrt[3]{\theta}, \quad (21)$$

где Σ – свойства обрабатываемой органической среды; $A \cdot f \cdot \sqrt[3]{\theta}$ – динамические режимы и размеры камеры.

Сравнение формулы (14) с (21) показывает, что они имеют общие черты. Соотношение (21) носит более идеализированный характер и содержит повышение амплитуды и частоты в первой степени. В соотношении (14) превышение амплитуды и частоты над порогом, с которого начинается движение среды, входит с показателем в n -й и β -й степени. Эта особенность отвечает

более реальным условиям, так как в поле тяжести виброперемещения частиц рабочей среды могут начаться только после преодоления ими некоторого энергетического порога. Поэтому вполне обоснованно можно считать данную формулу уточнением формулы (21) в части зависимости микропластической деформации от частоты и амплитуды. Вместе с тем зависимость микропластической деформации от объема загрузки, отраженная в формуле (21), имеет «принудительный» характер и должна быть предусмотрена в формуле (14).

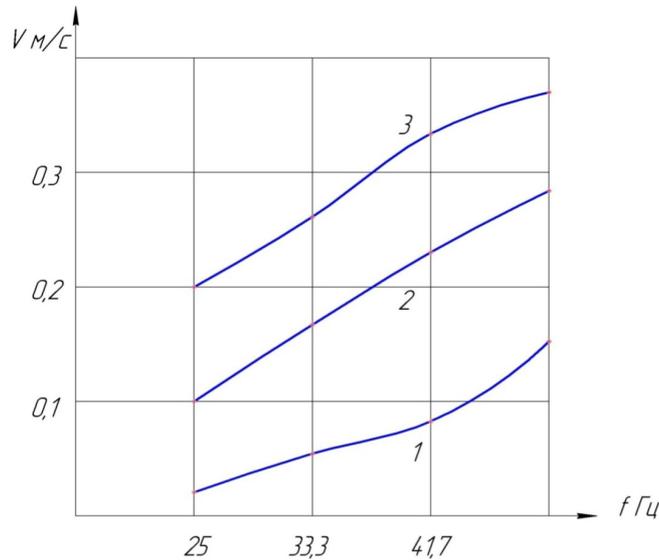


Рис.3. Зависимость циркуляционной скорости потока обрабатываемой среды от амплитуды и частоты вибраций камеры:
1 – A = 0,5 мм; 2 – A = 1,5 мм; 3 – A = 2,5 мм

Таким образом, модель процесса микросглаживания поверхностного слоя косточковыми органическими средами может быть представлена в следующем виде:

$$\delta = K_{cp} \cdot K_{Ra} \cdot K_D \cdot (A - A_0)^n \cdot (f - f_0)^\beta \cdot \cos \alpha \cdot \left[\frac{8 \cdot \pi \cdot m_\Sigma \cdot (1 - R^2)}{HB \cdot D} \right]^{0,5} \cdot \sqrt[3]{g}, \quad (22)$$

$$f_0 = 14 \text{ Гц}; \quad A_0 = \frac{q}{4\pi^2 \cdot f_0^2};$$

$$\frac{H}{L} \approx 1; \quad \frac{H}{D} > 6; \quad \frac{(A \cdot \omega)^2}{g \cdot H} < 0,5.$$

Для оценки производительности процесса виброотделки косточковыми органическими средами предлагается использовать теоретико-вероятностную модель, предложенную в работе [1] в виде

$$T_{обр} = \frac{i}{P \cdot f},$$

где $i = 15-20$; P – вероятность того, что любая точка обрабатываемой поверхности подвергается микропластической деформации за один энергоимпульс, сообщаемый органической среде.

Выводы. Сравнительный анализ экспериментальных данных, представленных на рис.1, с расчетными (3), (22) позволил уточнить коэффициенты корректировки влияния амплитуды ($n = 1,25$) и частоты ($\beta = 0,15$) на энергетические параметры обрабатываемой среды, а также по-

казал, что предложенная модель процесса микросглаживания позволяет с достаточной точностью (в пределах 10 – 15 %) оценить повышение качества отделки поверхности органическими средами в условиях виброобработки.

Библиографический список

1. Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования / В.А. Лебедев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 183 с.
2. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1998. – 624 с.
3. Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение: монография / Ю.Р. Копылов / Воронежский институт МВД России. – Воронеж, 1999. – 386 с.
4. Блехман И.И. Поведение сыпучих тел под действием вибрации / И.И. Блехман // Вибрации в технике: справочник. – М.: Наука, 1988. – Т.4. – С 78-98.
5. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И.Ф. Гончаревич. – М.: Наука, 1981. – 319 с.
6. Шевцов С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах / С.Н. Шевцов. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 194 с.
7. Карташов И.Н. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И.Н.Карташов. – Киев: Вища школа, 1975. – 188 с.
8. Кулаков Ю.М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю.М. Кулаков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.

Материал поступил в редакцию 29.09.09.

E.YU. KRUPENYA, V.A. LEBEDEV

MODELING OF THE PROCESS OF VIBRATING TREATMENT BY THE MEDIUM OF ORGANIC ORIGIN

The results of the theoretical and experimental researches of final smoothing of details' surface with the medium of organic origin are presented. The models for the estimation of quality of the surfaces and productivity of the process for expansion of technological possibilities of the vibrating processing of details with the help of this kind of medium are suggested.

ЛЕБЕДЕВ Валерий Александрович (р. 1948), заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Азовского технологического института, (филиал) ДГТУ, кандидат технических наук, профессор. Окончил РИСХМ (1974).

Область научных интересов: технологическое обеспечение качества поверхности и эксплуатационных свойств детали.

Автор 120 научных публикаций.

tmatidgtu@aanet.ru

КРУПЕНЯ Евгений Юрьевич (р. 1962), доцент кафедры «Технология машиностроения» Азовского технологического института, (филиал) ДГТУ. Окончил АЧИМСХ (г. Зерноград) в 1991 г.

Область научных интересов: технологическое обеспечение качества поверхности и эксплуатационных свойств детали.

Автор 6 научных работ.

tmatidgtu@aanet.ru