

ОБОБЩЕННАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЪЕМА СЛОЯ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛИ ПРИ ФИНИШНЫХ АБРАЗИВНЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ

Мельникова Е.П.

(АДИ ДонНТУ, г. Горловка, Украина)

Современный этап развития технологии машиностроения характеризуется ростом требований к качеству и надежности изделий, повышению их эксплуатационных свойств. В решении указанных задач важное место отводится совершенствованию и развитию финишных методов обработки, их типичными представителями являются: виброабразивная (ВиАО), доводка и хонингование, в процессе которых окончательно формируется поверхностный слой деталей, определяющий их эксплуатационные свойства.

Работы А.П. Бабичева, З.И. Кремня, А.В. Королева, В.Н. Латышева, А.Н. Мартынова, П.Н. Орлова, Л.В. Худобина, И.Х. Чеповецкого, В.М. Шумячера, Е.И. Фрагина, П.И. Ящерицина и других отечественных и зарубежных ученых посвящены исследованию механизмов действия инструмента и СОТС, определению путей оптимизации их составов, формированию поверхностного слоя деталей при абразивной обработке.

Однако до настоящего времени в литературе отсутствует систематически изложенная применительно к финишной обработке теория взаимодействия абразивного инструмента и детали, учитывающая влияние свойств инструментов и состава СОТС на производительность, качество и эксплуатационные свойства поверхности деталей.

В связи с этим, развитие теоретических основ финишных методов обработки, раскрытие закономерностей съема металла с учетом состава и свойств инструментов и СОТС, образования системы СПД (“СОТС + продукты диспергирования”) является актуальной комплексной научно-технической проблемой, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

Целью настоящей работы является разработка обобщенной модели съема поверхностного слоя деталей при финишных методах обработки с учетом состава и свойств СОТС.

Для получения обобщенной модели формирования единичного следа микрорезания при хонинговании и обработке свободным абразивом подробно рассмотрим силы, действующие на режущую частицу. Покомпонентная запись сил будет отнесена к системе координат (\tilde{h}, x) , начало которой помещено в точку первоначального касания частицы и поверхности детали.

Сила нормальной реакции со стороны деформируемой поверхности детали приложена, когда частица находится в контакте с поверхностью:

$$N(h) = \begin{cases} \pi R c \sigma_s h, & h > 0 \\ 0, & h \leq 0 \end{cases},$$

где R – радиус частицы; c – коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности; σ_s – предел текучести материала; h – глубина внедрения абразивной частицы, отсчитываемая по оси \tilde{h} и зависящая от времени.

Нормальная составляющая силы гидродинамического происхождения N_1 приложена в течение всего времени: до, в процессе контактирования, и по его

окончании, пока частица находится вблизи поверхности. В уравнениях движения эта сила будет присутствовать всегда своим постоянным значением [1].

Рассмотрим динамику взаимодействия хонинговального бруска с поверхностью детали, причем основой для этого рассмотрения будет система уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 h}{d\tau^2} = -P_N = -[N(h) + N_1 + N_x(h)] \\ m \frac{d^2 x}{d\tau^2} = -P_\tau = -[F + F_1] \end{cases},$$

где: $m = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_r$ – масса частицы; τ – время; N – нормальное усилие (в отсутствие СОТС); N_1 – нормальное усилие, обусловленное воздействием вязкопластичной жидкости; N_x – нормальное усилие, обусловленное внешней упругой силой; F – касательное усилие (при отсутствии слоя жидкости на поверхности обрабатываемой детали), F_1 – касательное усилие, обусловленное наличием слоя жидкости на поверхности обрабатываемой детали; R – радиус частицы; ρ_r – плотность материала частицы.

Отдавая себе отчет в том, что количество зерен на поверхности бруска, их радиус, высота выступания над связкой являются случайными величинами, прием для упрощения, что расчет можно провести, используя только их математические ожидания. Тогда среднее значение нормальной силы $n_{хон}$, приложенной к одному зерну со стороны упругих элементов, составит: $n_{хон} = p_n / v_z$, где p_n , v_z – соответственно среднее нормальное давление на брусок и среднее число режущих зерен на единицу поверхности бруска.

Полная сила, приложенная к бруску, очевидно, получается из последнего соотношения умножением его на площадь бруска и усреднением по всем зернам:

$$N_{хон} = p_n S_\sigma / V_z,$$

где S_σ – площадь бруска.

Давление, приложенное к бруску, изменяется при изменении сжатия упругих элементов: $p_n(h) = p_0 - c_{el}h$, где c_{el} – жесткость упругих элементов, p_0 – давление на брусок в начальный момент времени.

Сила упругого поджатия частицы к поверхности при хонинговании действует всегда:

$$N_x(h) = \frac{p_0}{v_z} - \frac{c_{el}}{v_z} h.$$

Сумма названных сил составляет нормальную составляющую полной силы:

$$P_N(h) = N(h) + N_1 + N_x(h).$$

Касательная сила, всегда противодействующая скорости v_x касательного перемещения частицы, дается формулой:

$$P_\tau = -f \cdot P_N \cdot \text{sgn}(v_x), \quad (1)$$

где f – коэффициент трения; $\text{sgn}(v_x)$ – функция, обозначающая знак аргумента v_x .

Рассмотрим начальную краевую задачу движения закрепленной частицы:

$$\begin{cases} \dot{h} = -\alpha^+ h + \eta; \\ h(0) = 0; \\ \dot{h}(0) = V_N. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь введены обозначения $\alpha^+ = \frac{\pi R c \sigma_s v_z}{m_{\sigma}} > 0$, $\eta = \frac{p_0 - N_1 v_z}{m_{\sigma}} > 0$,

где m_{σ} – масса бруска; индекс "+" указывает, что величина относится к этапу контактирования.

Первое слагаемое в правой части (2) ответственно за возникновение упругих колебаний, второе – квазипостоянная сила, прижимающая зерно к поверхности. Подставляя в задачу (2) значения α^+ , η и учитывая, что параметр α^+ имеет разрыв, когда зерно отрывается от поверхности, промоделируем численно движение этого зерна вдоль нормали к обрабатываемой поверхности.

Результаты моделирования, представленные на рис. 1, показывают, что в системе «упруго установленный брусок – зерна – поверхность детали» возникают релаксационные колебания с частотой, большей частоты свободных колебаний бруска на подвеске в 1,1...1,4 раза, причем величина этого отношения зависит от натяга (сплошные и штриховые линии на рис. 1).

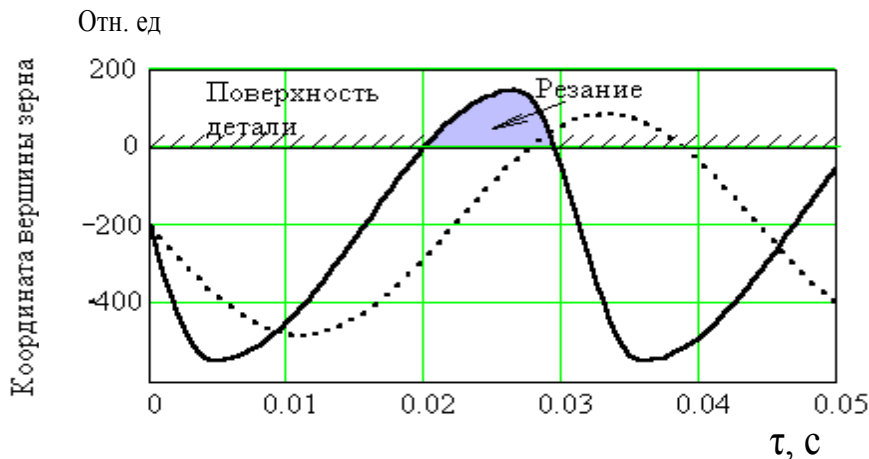


Рис. 1. Релаксационные колебания, вызванные упругостью закрепления брусков хонинговальной головки

Таким образом, период возникающих в системе релаксационных колебаний может быть выражен через период свободных колебаний:

$$T_r = \frac{2\pi}{k_r} \sqrt{\frac{C_{упр}}{m_{\sigma}}},$$

где: k_r – коэффициент, определяющий частоту релаксационных колебаний.

Находя общее решение задачи (2), удовлетворяющее заданным начальным условиям и исследуя его, приходим к выводу, что наибольшая глубина внедрения

$h_{\max}^{хон}$ и продолжительность $t_{конт}^{хон}$ пребывания частицы в контакте при хонинговании определяются формулами:

$$h_{\max}^{xon} = \frac{\eta}{\alpha^+} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{V_N^2 \alpha^+}{\eta^2}} \right]; \quad (3)$$

$$t_{\text{конт}}^{xon} = \frac{2(\pi - \theta^+)}{\sqrt{\alpha^+}}. \quad (4)$$

Координата и скорость частицы в момент прекращения контактирования будут начальными условиями для этапа движения частицы под действием только сил прижима и гидродинамической. Для упрощения выкладок сместим начало отсчета времени в точку, где вершина зерна выходит из контакта с поверхностью. Тогда, пренебрегая диссипацией энергии частицы при ее движении по нормали, получим уравнение и начальные условия:

$$\begin{cases} \ddot{h} = -\alpha^- h + \eta; \\ h(0) = 0; \\ \dot{h}(0) = -V_N, \end{cases}$$

где $\alpha^- = c_{\text{упр}}/m_{\delta} > 0$; индекс “-” относится к этапу отсутствия контакта, а величина η не изменяется по сравнению с предыдущей фазой движения.

Продолжительность пребывания частицы вне контакта $t_{\text{своб}}^{xon}$ с плоскостью

$$t_{\text{своб}}^{xon} = - \left(2\theta^- / \sqrt{\alpha^-} \right), \quad (5)$$

где $\theta^- = \arcsin \left(-V_N \sqrt{\frac{\alpha^-}{\eta^2 + V_N^2 \alpha^-}} \right)$ – угол фазового сдвига.

Сравнение времен, определяемых формулами (4) и (5), сумма которых составляет период релаксационных колебаний хонинговальных брусков, показывает, что при реальных значениях входящих в формулы величин относительное время пребывания в контакте значительно меньше периода времени, когда брусок отдален от поверхности слоем СОТС. Кроме того, достичь непрерывного следа при хонинговании практически невозможно, так как для этого потребовалось бы сделать жесткость поджатия брусков значительно выше контактной жесткости самих брусков.

В связи с тем, что при хонинговании скорость V_{δ} касательного движения брусков задана кинематически режимами обработки и никак не зависит от сил, развивающихся при микрорезании зернами абразива, длина следа частицы абразива будет равна

$$x_{\max}^{xon} = V_{\delta} \cdot t_{\text{конт}}^{xon}. \quad (6)$$

Рассмотрим процесс вибрационной обработке (ВиО), при котором, в отличие от хонингования, частицы не удерживаются упругими силами; поэтому движение свободной частицы по нормали определяется начальной задачей

$$\begin{cases} \dot{h} = -\beta^+ h + \zeta; \\ h(0) = 0; \\ \dot{h}(0) = V_N. \end{cases}$$

Введем обозначения: $\beta^+ = \frac{\pi R c \sigma_s}{m} > 0$, $\zeta = -\frac{N_1}{m} < 0$.

Наибольшая глубина внедрения частицы в этом случае

$$h_{\max}^{BuO} = \frac{\zeta}{\beta^+} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{V_N^2 \beta^+}{\zeta^2}} \right]. \quad (7)$$

Продолжительность пребывания частицы в контакте с плоскостью будет

$$t_{\text{конт}}^{BuO} = - \left(2\theta^+ / \sqrt{\beta^+} \right).$$

Для описания движения свободной частицы по касательной воспользуемся следующей начальной задачей:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{P_\tau}{m} = - \frac{fP_N \operatorname{sgn}(V_x)}{m}; \\ x(0) = 0; \\ \dot{x}(0) = V_\tau. \end{cases}$$

Решая ее, получим:

$$x_{\max}^{BuO} = \frac{\gamma}{\beta^+} \left(\cos\theta^+ - 2\theta^+ \sin\theta^+ \right) - 2 \frac{V_\tau \theta^+}{\sqrt{\beta^+}}. \quad (8)$$

Здесь введено следующее обозначение: $\gamma = - \frac{f\zeta}{m} \sqrt{1 + \frac{V_N^2 \beta^+}{\zeta^2}}$.

Таким образом, полученные соотношения (3), (4), (6), (7), (8) решают задачу определения размеров и частоты нанесения следов микрорезания единичной абразивной частицей, что позволяет определить съем как при единичном акте микрорезания, так и всей массой частиц абразивного инструмента.

Для расчета характеристик производительности процессов используем найденные значения длины x_{\max} пути частицы в контакте с поверхностью детали и наибольшей глубины h_{\max} внедрения. При этом будем полагать, что условия перехода к микрорезанию заведомо выполнены и весь вытесняемый частицей при движении объем материала переходит в стружку. Расчет единичного съема, использующий полученные соотношения для траектории, хотя и может быть выполнен численными методами, весьма сложен. Мы воспользуемся приближенным, но более наглядным путем, позволяющим довести результат до простой формулы. Для этого примем ряд допущений. Во-первых, будем полагать, что центр частицы движется не по сложной каплевидной траектории, а по параболе, и, во-вторых, форма лунки, оставляемой частицей, может быть аппроксимирована параболоидом. Определенную сложность вычисления единичного съема обуславливает то обстоятельство, что, внедряясь в материал, частица расширяет лунку и спереди, и сзади, что обусловлено ее сферической формой. Отметим здесь, что этот факт не учитывался в ранних работах, что приводило к значительным ошибкам и необходимости введения поправочных коэффициентов. Обсуждаемое здесь увеличение лунки иллюстрируется рис. 2.

Искомый объем лунки, образующийся при внедрении и движении частицы, после некоторых преобразований получим в виде:

$$q = \pi h_{\max}^2 R \sqrt{1 + \frac{x_{\max}^2}{8h_{\max} R}}. \quad (9)$$

Выражение (9) дает определение единичного съема абразивной частицей, так как использует только найденные с учетом гидродинамических процессов значения максимальной глубины внедрения, пути контакта и радиуса частицы.

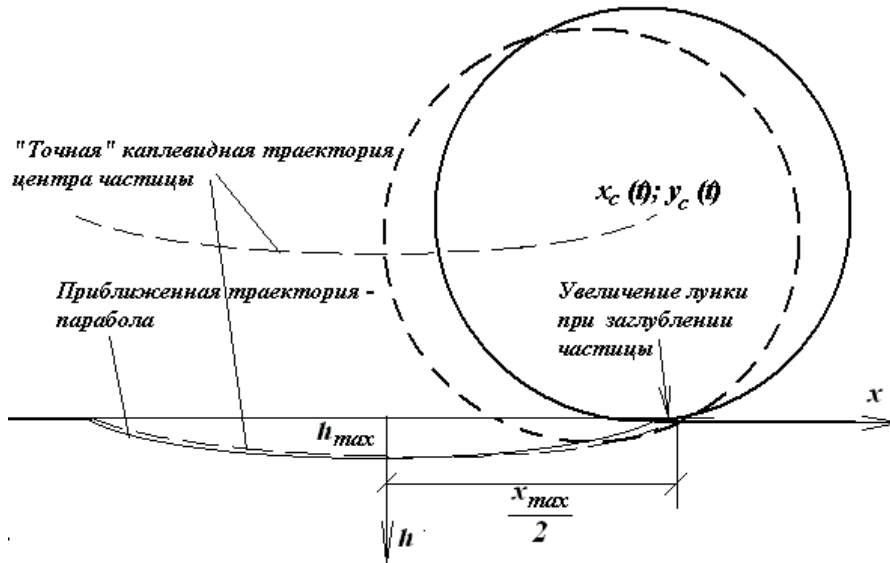


Рис. 2. Схема для определения объема лунки в результате микрорезания

Перейдем к определению интенсивности съема металла. При этом используем в основном теоретико-вероятностную методологию, представленную в работе [2], однако в отличие от нее будем определять удельный объемный съем металла:

$$\tilde{Q} = N_p \cdot q = n_p q / S_{\text{кв.уп.}},$$

где N_p , n_p – число актов микрорезания в единицу времени на единице площади детали и на площади детали, равной площади $S_{\text{кв.уп}}$ квадрата упаковки абразивных частиц [3, 4].

$$n_p = P_1 P_2 f_{\delta},$$

где P_1 – геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за один цикл воздействия массы абразивных частиц; P_2 – вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию; f_{δ} – частота циклов воздействия массы абразивных частиц на поверхность детали.

Для нахождения удельного объемного съема при ВиО используем найденные выше значения параметров единичного следа, вероятность перехода к микрорезанию и частоту воздействия на поверхность детали слоя абразива. В результате получим:

$$\tilde{Q}_{\text{ВиО}} = \pi^2 \frac{ab \cdot h_{\text{max}}^2 \sqrt{1 + a^2/4h_{\text{max}}D}}{2D(\pi a^2 + 4Da + D^2)} P_2 f_{\delta}, \quad (10)$$

где a , b – полуоси эллипса пятна контакта.

Домножив $\tilde{Q}_{\text{ВиО}}$ на плотность ρ материала и площадь поверхности детали, получим массовый съем.

Сравнительная простота уравнения (10) и тот факт, что оно включает в себя особенности процессов, связанные с наличием СПД, заставляет искать аналогии между вибрационной обработкой, хонингованием и притиркой.

Если рассмотреть схему хонингования внутренней цилиндрической поверхности площадью S_{δ} , для хонинговальной головки с числом брусков n_b брусками, толщина слоя материала, удаленного в единицу времени с этой поверхности составит:

$$\tilde{Q}_{xon} = \frac{k_r \cdot q_{xon} \cdot v_z \cdot S_{\delta} \cdot n_{\delta}}{2\pi \cdot S_d} \sqrt{\frac{m_{\delta}}{c_{ynp}}} \quad (11)$$

В соответствии с принятой моделью след единичного взаимодействия формируется на отрезке времени, показанного на рис. 1 штриховкой. Длина следа единичного взаимодействия будет зависеть от скорости движения хонинговального бруска и того периода его релаксационных колебаний, в течение которого развивается процесс микрорезания:

$$x_{\max}^{xon} = V_{\delta} \cdot \gamma \cdot T_r = \frac{2\pi \cdot V_{\delta} \cdot \gamma}{k_r} \sqrt{\frac{c_{ynp}}{m_{\delta}}} = 2\pi \cdot V_{\delta} \cdot \gamma_r \sqrt{\frac{c_{ynp}}{m_{\delta}}},$$

где коэффициент $\gamma_r \approx 0,15 \div 0,25$.

Полученное значение должно быть подставлено в уравнение (10) для получения величины единичного съема при хонинговании.

Перейдем к определению скорости съема при притирке-доводке. При этом будем полагать, что часть зерен абразивной пасты, внедрившихся в поверхность притира, воздействует на поверхность детали подобно тому, как это имеет место в процессе хонингования. Другая же часть абразивных зерен хаотически перемещается между поверхностями притира и детали, увлекаемых вязкими гидродинамическими силами со стороны СПД и других зерен.

Преобразуем выражения удельного съема, полученные для вибрационной обработки (10) и для хонингования (11) так, чтобы привести их к единому виду. Тогда при хонинговании:

$$\tilde{Q}_{xon} = k_{xon} \cdot q_{xon} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_d} \cdot f_{\delta}, \quad (12)$$

где $k_{xon} = k_r V_z$.

Съем при вибрационной обработке в среде свободного абразива

$$\tilde{Q}_{BuO} = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot P_2 \cdot q_{BuO}}{D^2 \cdot (\pi \cdot a^2 + 4D \cdot a + D^2)} \cdot f_{\delta}.$$

Так как в случае притира масса свободного абразива сосредоточена только над поверхностью притира (условно назовем ее S_n), удельный объемный съем в этом случае будет пропорционален отношению S_n/S_d :

$$\tilde{Q}_n = k_{BuO} \cdot q_n \cdot \frac{S_n}{S_d} \cdot f_{\delta}, \quad (13)$$

где обозначено $k_{BuO} = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot P_2}{D^2 (\pi \cdot a^2 + 4D \cdot a + D^2)}$.

Суммарный съем закрепленными и хаотически движущимися зернами будет равен:

$$\tilde{Q}_n = \tilde{Q}_{xon} + \tilde{Q}_{BuO} = (k_{xon} \cdot q_{xon} + k_{BuO} \cdot q_{BuO}) \frac{S_{\delta}}{S_d} \cdot f_{\delta}. \quad (14)$$

В данном случае частота f_{δ} вынесена за скобки, так как предполагается, что воздействие и закрепленных, и свободных зерен происходит с одинаковой частотой, обусловленной колебаниями притира при его движении вдоль обрабатываемой поверхности. При выводе окончательного выражения было также принято, что часть площади под притиром, занятая закрепленными зернами, значительно меньше всей площади S_n . Полученное соотношение выражает баланс двух механизмов удаления материала при притирке: закрепленным и свободным абразивом.

Изменение этого баланса достигается изменением среднего давления на притир и жесткости его крепления. Эти изменения приводят к изменению геометрических параметров следов обработки и, как следствие, к изменению параметров $k_{\text{хон}}$, $k_{\text{ВиО}}$, $q_{\text{хон}}$, $q_{\text{ВиО}}$, выражаемых формулами (12), (13), (14).

Результаты численного анализа полученных соотношений, приведенные на рис. 3, показывают, что:

- 1) физико-механические свойства, определяемые составом СОТС, существенно влияют на характеристики СПД и выходные технологические параметры финишной обработки;
- 2) увеличение предельного напряжения сдвига СПД, т.е. повышение показателя A , приводит к уменьшению глубины внедрения абразивного инструмента, единичного съема и удельного объемного съема;
- 3) увеличение показателя A от 0 до 1,5 в зависимости от прочностных характеристик обрабатываемого материала уменьшает удельный съем от 0,5 до 5 % от его величины.

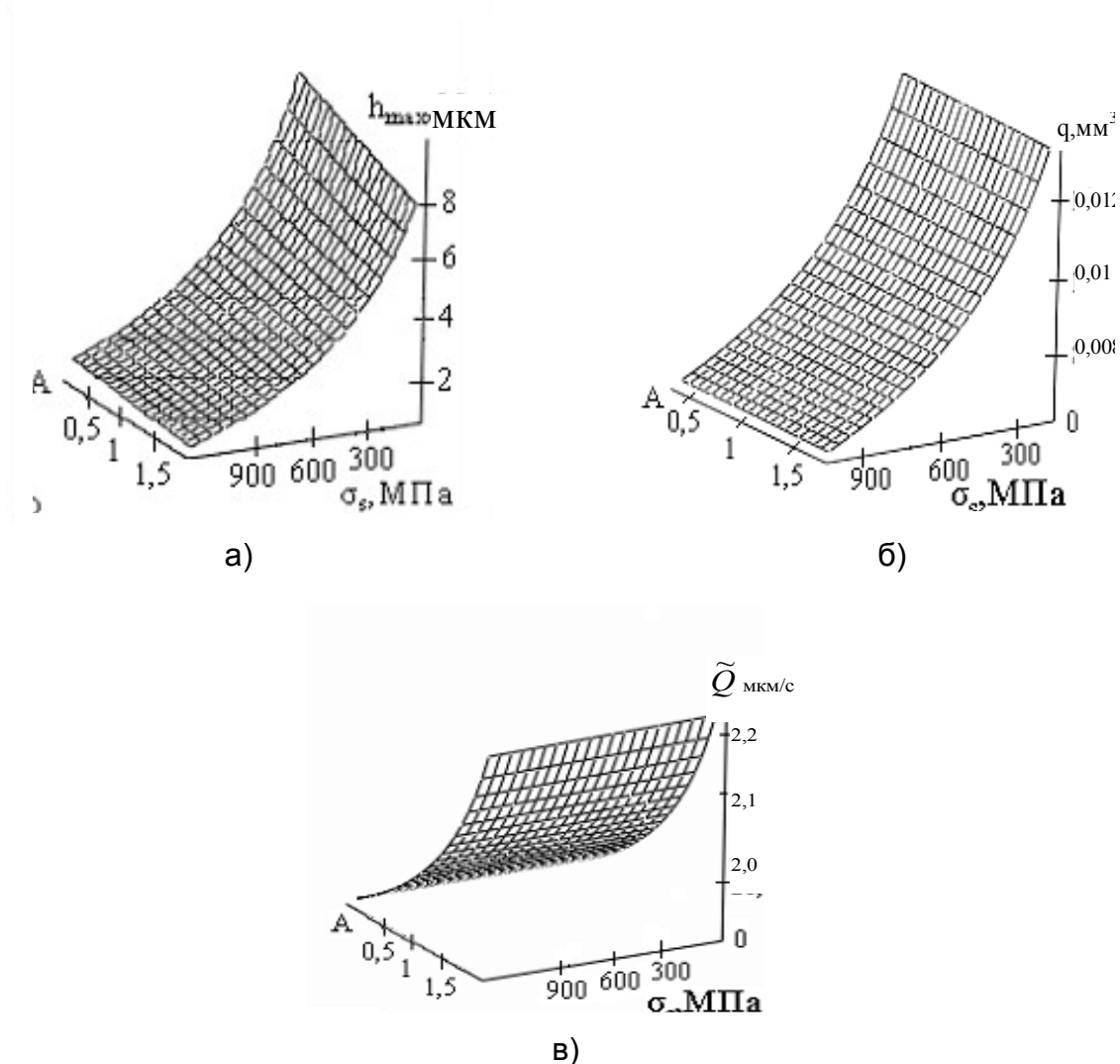


Рис. 3. Влияние предела текучести σ_s материала и свойств СПД (A) на максимальную глубину h_{max} внедрения (а), единичный съем q (б) и удельный объемный съем \tilde{Q} (в).

Следует отметить, что соотношения, полученные для главного показателя интенсивности процессов финишной обработки в свободных абразивах, хонинговании и притирке-доводке – удельного объемного съема материала, единообразно выражают его величину через объем q единичного съема абразивной частицы, динамические характеристики процессов ($k_{хон}, k_{ВиО}, f_{\sigma}$) и геометрический параметр: отношение площади инструмента к площади детали.

Список литературы: 1. Мельникова Е.П. Численно-аналитическая оценка характеристик интенсивности финишных методов обработки//Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 2003. – №3. – С. 2-26. 2. Тамаркин М.А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: Дис.... д-ра тех. наук: 05.02.08/ Ростов н/Д, 1995. – 298 с. 3. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. – Ростов н/Д: ДГТУ, 1999. – 620 с. 4. Бабичев А.П., Мишняков Н.Т. Теоретико-вероятностная модель процесса виброобработки плоской детали в случае эллиптических пятен контакта// Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология: Межвуз. сб. – Ростов н/Д: РИСХМ, 1981. – С. 8-10.

УЗАГАЛЬНЕНА АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ЗНІМАННЯ ШАРУ МАТЕРІАЛУ ДЕТАЛІ ПРИ ФІНІШНИХ АБРАЗИВНИХ МЕТОДАХ ОБРОБЛЕННЯ

Мельникова О.П.

Приведені результати розробки математичної моделі знімання поверхневого шару матеріалу при фінішних абразивних методах оброблення.

Запропонована модель ураховує вплив системи, яка складається із мастильно-охолоджувального технологічного середовища і продуктів диспергування, на глибину проникнення абразивного інструменту, одиничне і питоме об'ємне знімання при обробленні вільним абразивом, закріпленим абразивом та доводці.

ОБОБЩЕННАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЪЕМА СЛОЯ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛИ ПРИ ФИНИШНЫХ АБРАЗИВНЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ

Мельникова Е.П.

Представлены результаты по разработке математической модели съема поверхностного слоя металла при финишных абразивных методах обработки.

Предложенная модель учитывает влияние системы СПД, состоящей из смазочно-охлаждающей технологической среды и продуктов диспергирования, на глубину внедрения абразивного инструмента, единичный и удельный объемный съем при обработке свободным абразивом, закрепленным абразивом и доводке.

THE GENERALIZED ANALYTICAL MODEL OF PART LAYER REMOVAL AT ABRASIVE FINISHING METHODS OF MACHINING

Melnikova O.P.

Results on elaborating a mathematical model of part surface layer removal prediction during finishing abrasive machining have been presented.

The suggested model takes into account the influence of SPD system consisting of the lubricating-cooling fluid and disperse products on the abrasive tool on penetration depth, single removal and specific volume removal by the non-fixed abrasive, refining and fixed abrasive machining.