

Левинская И.М.

Зуев А.С.

Восточноукраинский  
национальный  
университет имени  
Владимира Даля

УДК 621.9.048

## ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПО ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССА ТУРБОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

*У статті дан огляд існуючих математичних моделей по опису процесу ТАО; показано, що в даний час для опису процесів, що відбуваються при ТАО, є теоретичний матеріал, але він не дозволяє з прийнятною точністю вирішувати задачу з визначення і дослідження впливу різних технологічних чинників на процес обробки.*

*The review of existent mathematical models with description of process of TAT is given; it is shown that for description of processes there is enough theoretical material at TAT, but it is not allow to decide a task on determination and research influence of different technological factors on the process of treatment.*

**Введение.** В современном машиностроении одним из относительно новых методов отделочно-зачистной обработки деталей является турбоабразивная обработка (ТАО) в псевдооживленном слое абразива [1, 2, 3, 4]. Согласно этому способу, в результате большого числа соударений частиц, приведенных сжатым воздухом во взвешенное состояние, с поверхности вращающейся детали происходит интенсивный съем металла и формообразование нового микрорельефа поверхности [4].

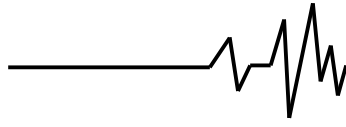
На протяжении всего времени исследований, направленных на изучение основных факторов, влияющих на эффективность и, соответственно, на повышение производительности ТАО, исследователями предлагались различные математические зависимости, основывающиеся на различных гипотезах и допущениях. Обработывались многочисленные экспериментальные данные, изучались процессы, происходящие при обработке, и с учетом различных параметров определялись эмпирические зависимости.

**Постановка проблемы.** В связи с этим есть необходимость в систематизации как факторов, влияющих на производительность процесса, так и зависимостей, предоставляющих возможность оценить влияние их на его эффективность, которую, в свою очередь, как и для других методов обработки свободными абразивами, можно оценить двумя параметрами: съемом материала с обрабатываемых поверхностей в единицу времени с единицы поверхности и достижением минимальной шероховатости поверхности за определенный промежуток времени (т.е. чем больше величина съема металла, а также чем быстрее достигается минимальная шероховатость поверхности, тем, соответственно, выше производительность). Различные подходы к теоретическому описанию процессов, протекающих при ТАО, и оценке эффективности обработки деталей данным способом, отраженные в различных математических зависимостях, представлены в таблице 1.

Таблиця 1

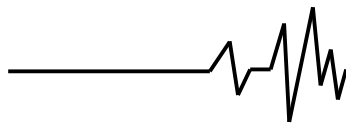
Математичні моделі, описуючі процеси, протекаючі при ТАО

№ п/п	Источник	Задачи, решаемые с использованием мат. модели	Основные допущения, принятые авторами	Математические зависимости	Недостатки
1	2	3	4	5	6
1.1	[3]	Теоретическое определение интенсивности съема металла при ТАО	- форма частиц – сферическая; - совокупность зерен характеризуется средними величинами размера $\bar{d}_z$ , массы $\bar{m}_z$ и скорости зерна в псевдоожиженном слое $U_3$ .	$Q = 33\gamma \cdot k_k^2 (2 - k_k) P_{БЭ} \cdot \cos\theta \cdot b_M^3 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot x,$ $\times (U_3 + U_{ок} \cdot \sin\theta \cdot \sin\beta)$ <p>где Q – съем металла с поверхности детали;  <math>\gamma</math> – плотность обрабатываемого материала;  <math>P_{БЭ}</math> – коэффициент, учитывающий соотношение процессов резания и трения при ТАО;  <math>k_k</math> – коэффициент пропорциональности;  <math>b_M</math> – константа пластичности металла;  <math>\theta</math> – угол наклона боковых сторон микронеровностей;  <math>\beta</math> – угол между направлением микронеровностей и вектором окружной скорости;  <math>U_3</math> – скорость зерна в кипящем слое;  <math>U_{ок}</math> – окружная скорость детали.</p>	Используется значительное количество коэффициентов, данные о которых ограничены; значения угла наклона боковых сторон микронеровностей и угла между направлением микронеровностей и вектором окружной скорости инженерной практике получить весьма затруднительно.
1.2	[4]	Теоретическое исследование влияния пограничного воздушного слоя на траекторию движения зерна в зоне обработки и условия его столкновения с обрабатываемой поверхностью.	- форма детали – бесконечный цилиндр; - режим обтекания абразивного зерна воздушным потоком турбулентный ( $Re \geq 10^3$ ).	$Q = f(U_{ок})$ <p>Используется уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности.</p> <p>Граничные условия: <math>\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0, \frac{dp}{dr} = \gamma_e \frac{u}{r^2}</math>.</p> <p>Здесь и далее используются следующие обозначения: <math>r, \alpha, z</math> – цилиндрические координаты; <math>u</math> и <math>p</math> – скорость и давление воздушного потока; <math>\gamma_e</math> и <math>\gamma_e</math> – плотность абразивного материала; вязкость воздуха; <math>\gamma_e</math> – плотность абразивного материала;</p>	Не учитывается влияние торцевых стенок вращающейся детали. Режим обтекания частиц при ТАО в процессе их движения будет изменяться от переходного ( $1 \leq Re < 700 \dots 800$ )



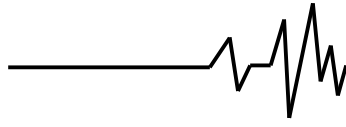
Продолжение табл. 1.

1	2	3	4	5	6
1.3	[5]	Теоретическое исследование влияния параметров абразивной среды (плотность, диаметр зерна) и детали (скорость вращения и радиус) на траекторию движения зерна в пограничном слое.	- форма частиц – сферическая; - дифференциальные уравнения движения сферической частицы справедливы при любом режиме обтекания воздушным потоком, при этом	<p><math>r_3</math> – радиус зерна; <math>R</math> – радиус цилиндра; <math>u_3</math> – скорость зерна в кипящем слое; <math>\omega</math> – угловая скорость вращения цилиндра. При движении воздушного потока относительно вращающейся детали образуется поле скоростей, которое описывается выражением: <math>u(r) = \frac{\omega R^2}{r}</math>, и поле давлений, которое описывается выражением: <math>p(r) = \frac{u_3 \omega^2 R^4}{2} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r^2} \right)</math>.</p> <p>Движущееся в воздушном потоке абразивное зерно, приближаясь к поверхности детали, испытывает воздействие полей скоростей и давлений. Получена система уравнений, описывающая траекторию движения зерна:</p> $\dot{r}^* = u_3,$ $\dot{\alpha} = \theta,$ $\dot{u}_3 = r^* \theta^2 - \sigma_3 u_3 - \frac{g \omega^2}{3 r^*}, \quad \text{где} \quad \sigma_3 = \frac{g}{2} \cdot \frac{\gamma_0}{\gamma_a} \cdot r_3^{-2},$ $\dot{\theta} = \sigma_3 \left( \frac{\omega}{r^* x^2} - \theta \right) - 2 \frac{u_3 \theta}{r^*}, \quad r^* = \frac{r}{R}.$	До турбулентного ( $R_e > 1000$ ), следовательно, некорректно использовать в данном случае уравнение неразрывности.
			Система дифференциальных уравнений движения частицы может быть представлена в следующем безразмерном виде:	$\frac{d\overline{W}_\gamma}{d\varphi} = \frac{\psi \cdot \rho \cdot \overline{W}_\gamma}{S_t \overline{W}_\varphi} + bA \frac{\rho_e}{\rho_3} \cdot \frac{1}{\rho^x} \cdot \frac{1}{\overline{W}_\varphi} \left( \frac{1}{\rho^x} - \frac{1}{\overline{W}_\varphi} \right) - \frac{\rho_e}{\rho_3} \cdot \frac{1}{\rho^{2x}} \cdot \frac{1}{\overline{W}_\varphi},$ $\frac{d\overline{W}_\varphi}{d\varphi} = -\overline{W}_\gamma - \frac{\psi \cdot \rho \cdot \overline{W}_\gamma}{S_t \overline{W}_\varphi} \left( \frac{1}{\rho^x} - \frac{1}{\overline{W}_\varphi} \right) + bA \frac{\rho_e}{\rho_3} \cdot \frac{1}{\rho^x} \cdot \frac{1}{\overline{W}_\varphi},$	Не учитывается форма абразивного зерна. Режим обтекания частиц в процессе их движения будет изменяться от переходного ( $1 \leq R_e < 700 \dots 800$ ) до турбулентного ( $R_e > 1000$ ).



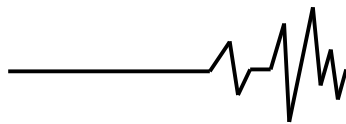
Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
		<p>коэффициент аэродинамического сопротивления зависит от числа Рейнольдса; - воздушный поток, создаваемый вращающейся деталью вихревой (т.е. частицы при своем движении в пограничном слое вращаются).</p>	<p><math>\frac{d\rho}{d\varphi} = \rho \cdot \frac{\overline{W}_r}{\overline{W}_\varphi}</math>; где <math>\varphi</math> и <math>\rho = r/R_A</math> - угловая и радиальная координаты частицы;</p> <p><math>\overline{W}_r = \frac{W_r}{V_A}</math>; <math>\overline{W}_\varphi = \frac{W_\varphi}{V_A}</math>; <math>\overline{V}_\varphi = \frac{V_\varphi}{V_A} = \frac{1}{\rho^k}</math> - безразмерные проекции относительных скоростей частицы (<math>W</math>) и воздушного кругового потока (<math>V</math>);</p> <p><math>\psi = c \cdot R_e</math> - приведенный (линейный) коэффициент аэродинамического сопротивления, где <math>c = f(R_e)</math> - квадратичный коэффициент сопротивления;</p> <p><math>R_e = R \left[ \overline{W}_r^2 + \left( \frac{1}{\rho^k} - \overline{W}_\varphi \right)^2 \right]^{1/2}</math> - число Рейнольдса для частицы;</p> <p><math>S_t = \frac{4}{3} \frac{d_3^2}{\eta_e} \cdot \rho_3 \cdot \frac{V_A}{R_A}</math>; <math>R = \frac{d_3}{\gamma_e} \cdot V_A</math>;</p> <p>- безразмерные критерии подобия (критерий Стокса <math>S_t</math> и критерий <math>R</math>) определяют соотношение вязкостных и инерционных сил, соотношение вязкостных и инерционных сил, соответственно при ламинарном режиме обтекания и при режимах, отличающихся от вязкостного (стоксовского) и инерционного (ньютоновского);</p> <p><math>\rho_e, \eta_e, \gamma_e</math> - плотность, динамическая и кинематическая вязкость воздуха;</p> <p><math>\rho_3, d_3</math> - плотность и диаметр сферической частицы.</p> <p><math>A \approx 0,3 \dots 0,4</math> - коэффициент.</p>	<p>Связь между нормальной силой <math>P_y^*</math> и глубиной внедрения <math>h</math> при упругопластичном ударе выражается следующим образом:</p>	<p>Сложность осуществления таких</p>
1.4	[4]	Теоретическая модель соударения	Взаимодействие между		



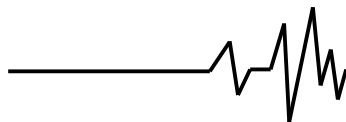
Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
	<p>абразивного зерна с металлом, учитывающая свойства металла, размер и форму абразивного зерна, свойства абразивного материала и энергию зерна</p>	<p>большинством зерен с металлом имеет упругопластический характер</p>	<p><math>h = bP_y^n</math>, где <math>b</math> и <math>n</math> – константы пластичности, экспериментально определяемые для различных материалов. Наибольшее значение глубины внедрения зерна в конце активного этапа соударения равно</p> $h_{\text{max}} = \left( E_3 \frac{n+1}{n} b \frac{V_3}{n} \right)^{\frac{n}{1+n}}, \text{ где } E_3 = \frac{m_3 \cdot U_3^2}{2} - \text{кинетическая энергия зерна } (m_3 \text{ и } U_3 - \text{масса и скорость зерна}).$ <p>При <math>h = h_{\text{max}}</math> развивается усилие:</p> $P_{\text{у макс}} = \left( \frac{h_{\text{max}}}{b} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( E_3 \frac{n+1}{n} \right)^{\frac{1}{1+n}} \frac{1}{U_3^{\frac{1}{n(n+1)}}}$ <p>Расчетная формула для полного времени соударения имеет следующий вид:</p> $\tau = \left( E_3 b \frac{V_3}{n} \frac{n+1}{n} \right)^{\frac{n}{1+n}} \frac{1}{U_3} F_1(n) + \left( E_3 \frac{n+1}{n} \right)^{\frac{1}{-6(n+1)}} b^{\frac{1}{6(n+1)}} \sqrt{\frac{5mk}{4} F_1\left(\frac{2}{3}\right)}$ <p>где <math>F_1</math> – табулированная функция,</p> $k = \left[ \frac{3}{4} \left( \frac{1 - \mu_a^2}{E_a} - \frac{1 - \mu_k^2}{E_k} \right) \right] \frac{1}{3}$ <p>Константы <math>b, n, E_a, \mu_k</math> учитывают свойства металла; <math>m_3</math> и <math>U_3</math> – масса и плотность зерна; константы <math>E_a, \mu_k</math> учитывают свойства абразивного материала.</p> <p>Закономерность изменения порозности псевдооживленного слоя относительно крупных частиц (диаметром более 0,32 мм) в</p>	<p>расчетов инженерной практике.</p>	<p>Не учитывалось влияние движущейся</p>
1.5	[6]	Гидродинамическая модель свободной	- псевдооживленная среда –		



Продолжение табл. 1

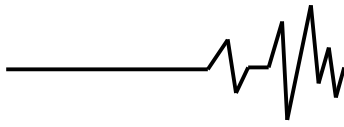
1	2	3	4	5	6
1.6	[6]	Теоретическое исследование закономерности расширения псевдооживленного слоя с погруженным в него протяженным телом	<p>совокупность непрерывной (однородной) фазы с высокой концентрацией частиц и всплывших в ней пузырей газа (дискретной фазы);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- все параметры уменьшились с учетом Деления псевдооживленной среды на три области:</li> <li>- прирешеточную, и основную надслоевую;</li> <li>- рассматривался внутренний одномерный процесс фильтрации несжимаемой жидкости.</li> </ul>	<p>зависимости от изменения скорости газа в аппарате для небольших чисел псевдооживления (<math>2 \leq N \leq 7</math>) имеет вид:</p> $\langle \varepsilon_{ca} \rangle \leq \frac{1 + 2 \left[ \varepsilon_N + (1 - \varepsilon_N) \left( 1 - f_w \left( 1 - \frac{W_{za} F_a - \omega_{zx} (1 - f_w) V_{zo}}{W_{zn} F_a \varepsilon_N} \right) \right) \right]}{3} \quad \text{Законо}$ <p>мерность относительного расширения свободного неоднородного псевдооживленного слоя относительно крупных частиц (<math>d &gt; 0.32</math> мм) имеет вид:</p> $\frac{H_{ca}}{H_0} = \frac{2 - 2 \left[ \varepsilon_N + (1 - \varepsilon_N) \left( 1 - f_w \left( 1 - \frac{W_{za} F_a - \omega_{zx} (1 - f_w) V_{zo}}{W_{zn} F_a \varepsilon_N} \right) \right) \right]}{3(1 - \varepsilon_0)} \quad \text{где:}$ <p><math>\varepsilon_{ca}</math> – изменение порозности слоя; <math>\varepsilon_N</math> – порозность непрерывной фазы; <math>\varepsilon_0</math> – порозность средняя по объему; <math>W_{za}</math> – скорость газа в аппарате (расход газа через единицу слоя); <math>F_a</math> – площадь аппарата; <math>V_{zo}</math> – вязкость пузырей в основной области; <math>W_{zn}</math> – скорость непрерывной фазы.</p>	<p>Детали, погруженной в слой, на изменение его структуры.</p>
1.6	[6]	Теоретическое исследование закономерности расширения псевдооживленного слоя с погруженным в него протяженным телом	<p>форма частиц – сферическая;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вес частиц при любой скорости оживающего газа, не превышающий скорости уноса частиц, считается</li> </ul>	<p>Относительное расширение слоя при условии, что <math>\varepsilon_{ca} \approx \varepsilon_{ca}^*</math> (т.е. изменением величины <math>\varepsilon_{ca}</math> после погружения пренебрегается):</p>	<p>Не учитывалось влияние движения детали, погруженной в слой, на изменение его структуры.</p>



Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
		<p>неизменным.</p>	$\frac{H_{ca}^*}{H_0} = 1 + \frac{h \left( \frac{D_T}{D_a} \right)^2}{(1 - \varepsilon_0) \left( 1 - \left( \frac{D_T}{D_a} \right)^2 \right)} \times$ $\left[ \frac{1 + 2 \left( \varepsilon_n + (1 - \varepsilon_n)(1 - f_w) \left( 1 - \frac{W_{za} F_a - \omega_{zn} (1 - f_w) V_{no}}{W_{zn} F_a \varepsilon_n} \right) \right)}{3} - \varepsilon_0 \right]$	<p>Относ</p> <p>ительное расширение слоя при условии, что <math>\varepsilon_{ca} \neq \varepsilon_{ca}^*</math> (т.е. изменением величины <math>\varepsilon_{ca}</math> после погружения не пренебрегается):</p> $\frac{H_{ca}^*}{H_0} = \frac{(1 - \varepsilon_n)(1 - \varphi_n^*(1 - f_w))}{(1 - \varepsilon_n^*)(1 - \varphi_n^*(1 - f_w^*))} +$ $\frac{(\varepsilon_n^*(1 - \varphi_n^*(1 - f_w^*)) + \varphi_n^*(1 - f_w^*) - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon_n)(1 - \varphi_n(1 - f_w))}{(1 - \varepsilon_n^*)(1 - \varphi_n^*(1 - f_w^*)) (1 - \varepsilon_0) \left( 1 - \frac{D_T^2}{D_a^2} \right)}$	

:  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_n^*$  – порозность непрерывной фазы до и после погружения протяженного тела;  $\varepsilon_0$  – порозность средняя по объему;  $W_{za}$  – скорость газа в аппарате (расход газа через единицу слоя);  $F_a$  – площадь аппарата;  $V_{no}$  – вязкость пузырей в основной области;  $W_{zn}$  – скорость непрерывной фазы;  $D_a$  и



В свою очередь, авторами работ [1-5] на основе теоретических, а также экспериментальных исследований отмечается, что к основным факторам, которые оказывают влияние на интенсивность съема металла при ТАО, можно отнести следующие: расположение обрабатываемой детали по отношению к плоскости газораспределительной решетки (кинематическая схема обработки); скорость движения обрабатываемой детали; время обработки; давление (расход) воздуха, подаваемого в установку на ожигание абразивного слоя; способ подачи воздуха – стационарный или импульсный; зернистость и вид (марка) абразивного зерна; физико-механические свойства обрабатываемого материала (твердость, прочность); характер исходной поверхности, подлежащей обработке (высота микронеровностей и их направление, способ предварительной обработки – точение, фрезерование, литье, штамповка и т.д.).

Учитывая, что процесс турбоабразивной обработки характеризуется количественными и качественными показателями, то, естественно, была осуществлена попытка прямой оценки производительности процесса, в связи с этим из всех работ необходимо выделить работу [3]. В данной работе на основе теории удара, основных положений теории псевдоожигания сыпучих материалов, аэродинамики, теории трения и износа, теории случайных процессов автор анализирует взаимосвязи основных факторов, влияющих на процесс обработки. В комплексе выражений, представляемых автором в математической модели (табл.1, п.1.1) в зависимости от режимов, характеристик абразивного зерна и свойств обрабатываемого материала, удается оценить интенсивность съема металла и, соответственно, спрогнозировать результат ТАО. Однако заложенные автором в модели коэффициенты, такие, как: угол наклона боковых сторон микронеровностей и угол между направлением микронеровностей и вектором окружной скорости, – в инженерной практике получить весьма затруднительно, что весьма существенно ограничивает применимость данной зависимости.

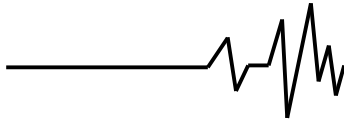
Наряду с прямой оценкой, предлагались теоретические зависимости, дающие возможность косвенно оценить эффективность процесса [2-6], например, при рассмотрении движения воздушного потока относительно вращающейся детали и исследовании его влияния на траекторию движения зерна в зоне обработки и условия его столкновения с

обрабатываемой поверхностью в зависимости от различных технологических условий обработки.

Как известно, при ТАО сообщение детали вращения с высокой скоростью (в диапазоне от 15 до 30 м/с) направлено на обеспечение высокой частоты соударения каждого участка обрабатываемой поверхности с абразивными зернами, а также для увеличения тангенциальных сил и времени контакта зерна с поверхностью. В то же время, как отмечают авторы [7], уже начиная со значения скоростей, равных 20 м/с, создаваемая вращением детали аэродинамическая воздушная прослойка изменяет траекторию движения зерна в граничном между деталью и средой слое. Объяснить появление аэродинамической прослойки можно тем, что вращающаяся деталь увлекает близлежащие слои воздуха, в результате чего они также получают вращение вокруг тела, то есть начинают циркулировать вокруг него. Изменение характера взаимодействия абразивного зерна за счет появления данного слоя, а соответственно, и изменение интенсивности съема металла с поверхности вращающейся детали вынуждает авторов уделять значительное внимание рассмотрению и детальному исследованию данного вопроса.

Так, в работе [4] предлагается теоретическое исследование движения абразивного зерна в зоне обработки с учетом размера абразивного зерна и скорости детали. Однако предложенная автором гидродинамическая модель не позволяет корректно отразить реальную картину данного процесса, т.к. режим ламинарного обтекания, для которого решается данная модель, вдоль всей траектории движения зерна до его встречи с поверхностью детали будет соблюдаться лишь для пылевидных частиц, размером не более  $3...4 \text{ г/см}^3$ , но, как известно, в практике осуществления ТАО применяют абразив зернистостью F80 - F24 (диаметр  $d_z = 160...800 \text{ мкм}$ ), соответственно режим обтекания частиц такого размера в процессе их движения будет меняться от переходного ( $1 \leq R_e < 700...800$ ) до турбулентного ( $R_e > 1000$ ). В свою очередь, на основе данных теоретических исследований автором даются соответствующие практические рекомендации, а именно – по рациональному выбору размера абразивного зерна и скорости вращения детали, также предлагаются способы борьбы с образованием воздушной прослойки вокруг





вращающейся детали, такие, как: введение в камеру дополнительных воздушных потоков, использование пульсирующего псевдооживленного слоя.

В работе [5] также рассматривается влияние пограничного слоя, созданного вращающейся деталью, с учетом технологических условий обработки, а именно – плотности и зернистости абразива, радиуса и скорости вращения детали – на эффективность, а также анализируются недостатки предыдущих работ. Авторами вновь предлагается гидродинамическая модель процесса, где решается уравнение Навье-Стокса (см. табл. 1, п.1.2), однако задача решена для ламинарного потока, что не соответствует условиям протекания ТАО. К недостаткам данной модели, как, впрочем, и предыдущей, можно отнести то, что не происходит учета влияния формы абразивного зерна, в то время как при ТАО не используются шлифовальные материалы со сферической формой зерна (например, форма кристаллов электрокорунда нормального – толстотаблитчатая и ромбоэдрическая, карбида кремния – игольчатая [8]).

В свою очередь, отдельно от всех моделей можно выделить группу моделей, в которых не ставились цели определить эффективность процесса обработки деталей псевдооживленным слоем, однако процессы, протекающие и учитывающиеся в них, имеют место и при ТАО, так, например, математические модели 1.5-1.6 из таблицы 1.

**Заключение.** Изложенное выше позволяет заключить, что в настоящее время для описания процессов, происходящих при ТАО, имеется разрозненный теоретический материал, не позволяющий с приемлемой точностью решать задачу по определению и исследованию влияния различных технологических факторов на процесс обработки. Известные решения задачи определения съема материала (как характеристики ТАО) включают в себя большое количество эмпирических коэффициентов, что затрудняет практическое использование этих зависимостей. В настоящее время отсутствует методика расчета, позволяющая адекватно отражать реальные процессы, происходящие

при турбоабразивной обработке. Как следствие, имеющийся теоретический материал в виде соответствующих моделей охватывает не все стороны многофакторного процесса обработки деталей турбоабразивным методом и не пригоден для инженерных расчетов и проектирования оборудования.

#### **Литература**

1. Технологія виробництва авіаційних двигунів: Ч. 3. Методи обробки деталей авіаційних двигунів / [Богуслав В.О., Качан О.Я., Яценко В.К. та ін.] – Запоріжжя: ВАТ «Мотор Січ», 2008. – 639 с.
2. Massarsky M. Turbo-abrasive machining and finishing / M. Massarsky, D. Davidson // Metal Finishing – 1997. – №95. – P. 29.
3. Массарский М.Л. Повышение эффективности отделочной абразивной обработки деталей сложного профиля на основе разработки и внедрения нового технологического способа – турбоабразивной обработки: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Массарский Моисей Липович – Саратов, 1989. – 27 с.
4. Кремень З.И. Турбоабразивная обработка деталей сложного профиля: Метод. рекомендации // Кремень З.И., Массарский М.Л., Гузель В.З. – М.: ВНИИТЭМР, 1987. – с.53
5. Попенко А.И. Повышение эффективности турбоабразивной обработки цилиндрических деталей / А.И. Попенко, А.Я. Качан // Технологические системы. – 2003. – № 19. – С. 11 – 18.
6. Техника и технология псевдооживления: гидродинамика и теплообмен с погруженными телами / [Дворецкий С.И., Королев В.Н., Нагорнов С.А. и др.] – Тамбов: ТГТУ, 2005. – 168 с.
7. Зверовщиков А.В. Совершенствование технологии шпиндельной обработки деталей при уплотнении шлифовального материала внешним давлением: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Зверовщиков Анатолий Владимирович. – Пенза, 2004. – 270 с.
8. Абразивные материалы и инструменты. Каталог-справочник. / [Под ред. В.А. Рыбакова]. – М.: НИИ по машиностроению, 1981. – 360 с.