

УДК 533.6 : 621.78

ДВИЖЕНИЕ МИКРОЧАСТИЦ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ ПРИ ПНЕВМОДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

© 2020 Ю.И. Кургузов, Д.А. Люшня

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 12.05.2020

С применением положений аэродинамики и механики рассмотрено движение микрочастиц в воздушном потоке, направленном на плоскую экранирующую поверхность. Уточнена структура незатопленной струи, выделено ядро струи с его геометрическими, кинематическими и динамическими параметрами, воспроизводимыми на обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: затопленная свободная воздушная струя, незатопленная струя, структура струи, ядро струи, уравнения движения микрочастиц, скорость, массовый секундный расход, давление струи микрочастиц, площадь отпечатка, распределение давления.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-120-126

ВВЕДЕНИЕ

Режим упрочняющей пневмодробеструйной обработки определяется [1] скоростью движения дроби, её размером, плотностью, с которой дробь покрывает ту или иную по форме поверхность обрабатываемой детали, углом атаки, который в зависимости от вида поверхности может принимать различные значения, и продолжительностью воздействия дроби на соответствующий участок поверхности. Некоторые из перечисленных факторов не поддаются точному определению, что заставляет режим характеризовать другими параметрами, например, давлением воздуха, количеством и диаметром отверстий сопел, скоростью относительного перемещения сопла и обрабатываемой поверхности (подачей), расстоянием заготовки от сопла. Вследствие сказанного режим упрочнения в каждом конкретном случае сначала обрабатывается на производственной установке, например, с помощью пластин Альмена, затем фиксируется в технологической документации.

В предлагаемой статье обращено внимание на формирование структуры струи, представляющей собой смесь воздуха с материальными микрочастицами, и на её влияние на геометрические, кинематические и динамические показатели процесса обработки.

При обработке поверхностей потоком микрочастиц диаметра 0,4...0,6 мм в качестве инструментальной оснастки используется эжектор. Это устройство, в котором происходит

передача кинетической энергии от одной среды – воздуха, движущегося с большей скоростью по каналу высокого давления, к другой – микрочастицам (микрошарикам), подаваемым по другому трубопроводу. Передача энергии происходит в процессе смешения двух сред в камере низкого давления. Смесь через прямое отверстие, либо через отверстие с профилем Вентури свободной струёй выходит из сменного сопла.

Если на выходе из сопла в струю вовлекаются слои окружающего воздуха с такими же физическими свойствами, то воздушная струя в таких случаях считается затопленной с возникшей в ней зоной турбулентного перемешивания. Но в струе, о которой пойдёт речь, присутствуют материальные частицы, имеющие иные свойства и создающие незатопленную струю, которая искажает характер их движения.

Структурное состояние затопленной воздушной струи, одинаковое для всех направлений её движения, рассмотрено в известной работе Г.Н.Абрамовича [2] и показано на рис. 1.

На формирование и структуру свободной струи, выпущенной в пространство, решающее влияние оказывает коэффициент турбулентности a , определяющий интенсивность переноса и перемешивания микрочастиц при истечении из сопла диаметра d_0 и зависящий от формы подводящего участка трубы перед отверстием. Чем интенсивнее перемешивание и больше численное значение коэффициента турбулентности, тем больше угол расширения струи и ближе расположен условный полюс O струи к кромкам трубы. В практических расчетах для свободной круглой струи, исходящей из прямого отверстия радиуса r_0 или отверстия с диффузором, коэффициент a принят равным 0,08. В этом случае угол одностороннего расширения внешней границы струи $\alpha_1 \approx 15^\circ$, угол внутренней границы $\alpha_2 \approx 7^\circ$. Протяжённость внутренней границы

Кургузов Юрий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты».

E-mail: tms@samgtu.ru

Люшня Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». E-mail: tms@samgtu.ru

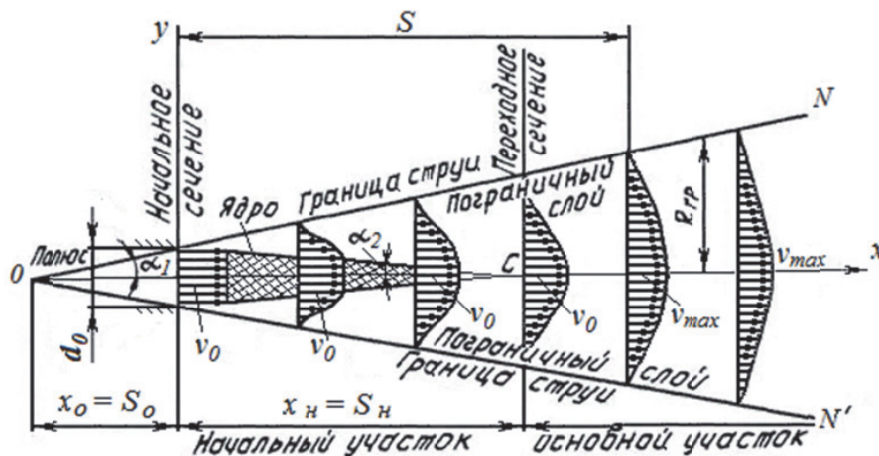


Рис. 1. Структурная схема свободной затопленной струи

определяется начальным участком струи (до точки С)

$$x_n = S_n = r_0 \cdot \frac{0,67}{a},$$

на котором скорость потока по аэродинамической оси x практически неизменна и равна v_0 . При $r_0 = 4$ и 5 мм начальная длина соответственно равна $S_n = 33,5$ и 42 мм.

На основном участке, благодаря сопротивлению окружающей среды, появляется незначительная по величине скорость в поперечном направлении, которой обычно пренебрегают. Её наличие приводит к распылению потока. Скорость турбулентного движения падает, оставаясь максимальной вблизи оси x, где образуется ядро струи. Пограничный слой внутри струи разделяет зоны ламинарного и турбулентного движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рассматриваемом случае при установившемся процессе обработки струя выбрасывается

в пространство, ограниченное экранирующей поверхностью, отстоящей от сопла на расстояние $S \leq 180$ мм, и потому уже на начальном участке движения, не говоря об основном участке, её нельзя считать свободной. На рис. 2 изображена построенная в модуле *AnsysFluent* модель истечения из отверстия диаметра $d_0 = 8$ мм со скоростью $v_0 = 70$ м/с воздуха, направленного под прямым углом ($\gamma = 90^\circ$) на плоскую поверхность, расположенную от сопла на расстоянии 120 мм.

Аналогичную по структуре струю (рис. 3) получают при впрыске распылённого топлива в цилиндр дизельного двигателя внутреннего сгорания на стадии сжатия смеси. И на одном рисунке, и на другом рисунке ядро окружено распылённым слоем, давление которого сужает двусторонний угол расширения условно называемой внешней границы с $2\alpha_1 = 30^\circ$ до $\delta = 20^\circ$.

Условная внешняя граница струи (рис. 2) размыта и только за её пределами прослеживается чётко выраженный раздел с окружающим воздухом, где скорость равна нулю. Такую струю даже при отсутствии в ней микрочастиц следует

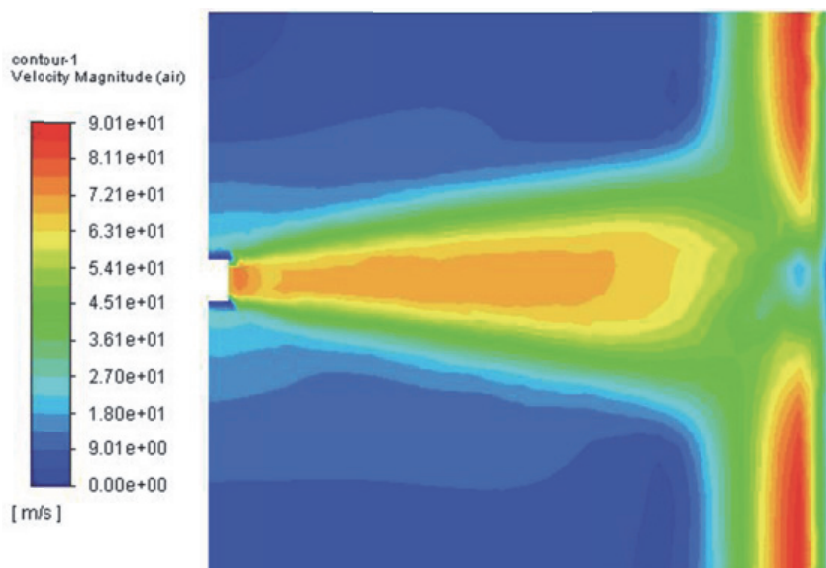


Рис. 2. Скоростная модель движения воздуха в зоне обработки

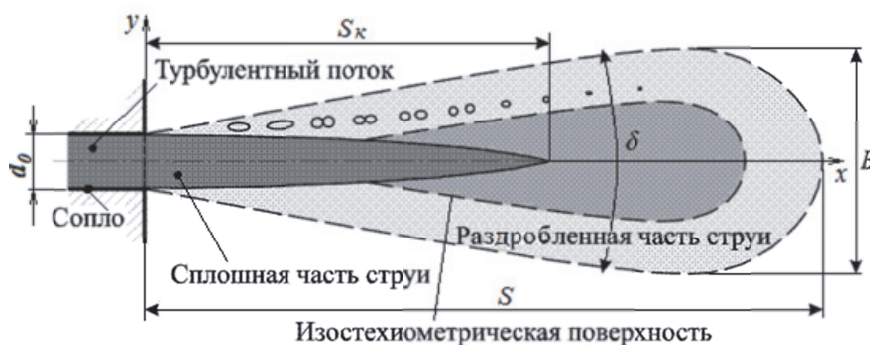


Рис. 3. Структурная схема несвободной незатопленной струи

считать незатопленной. Длина её компактного участка S_k , где начальная скорость практически сохраняется неизменной, возрастает с 33,5 до 52,5 мм, т.е. в 1,5 раза. При дальнейшем движении вследствие возрастания сопротивления, исходящего от экрана, продольная скорость воздушной струи падает, появляется составляющая скорости, параллельная поверхности экрана, и струя растекается по поверхности.

В центре аэродинамической оси на расстоянии 7 мм от места падения (рис. 2) образуется застойная зона. У растекающегося потока, как и у падающего потока, имеется не касающаяся поверхности центральная часть с турбулентным слоем, где воздух движется с высокой скоростью. А около поверхности отмечается ламинарный слой, в котором скорость воздуха из-за возникших сил трения в 3 – 4 раза ниже начальной скорости. Застойная зона отмечается также при исследуемом угле атаки $\gamma = 66^\circ$. В этом случае эта зона чуть смещена от оси струи в сторону острого угла, куда течение воздуха затруднено, но она исчезает при перемещении сопла относительно экрана. Расходящийся поток устремлён в более открытую сторону, в сторону меньшего сопротивления.

На рис. 4 показана модель истечения из отверстия газового потока со взвешенными

микрочастицами, на которые действуют силы тяжести и силы сопротивления окружающей среды. Модель построена с помощью программы *EDEM*, имитирующей и анализирующей поведение сыпучих материалов.

Смесь поступает в трубку Вентури и выбрасывается из неё под углом $\gamma = 90^\circ$ к обрабатываемой поверхности со скоростью 64 м/с. При подходе к экрану, размещённому от сопла на расстоянии 120 мм, скорость практически сохраняется (снижается на 2 м/с). А далее на оси потока, непосредственно около поверхности набегающий поток частиц сталкивается с отражёнными частицами, которые разносятся симметрично во все стороны. Такой симметрии не наблюдается при острых углах атаки. Благодаря естественному рассеиванию, характерному для выстрела из пневматического ствола, каждая микрочастица движется по своей траектории. Все вместе они образуют компактный участок струи со снопом траекторий, присущих ядру потока, и с двусторонним углом расширения границы ядра, равным 6 - 8°. В этой модели также отмечается чёткая внешняя, раздробленная граница струи с окружающим пространством.

Представленная имитационная модель, с точки зрения адекватности, и с целью опреде-

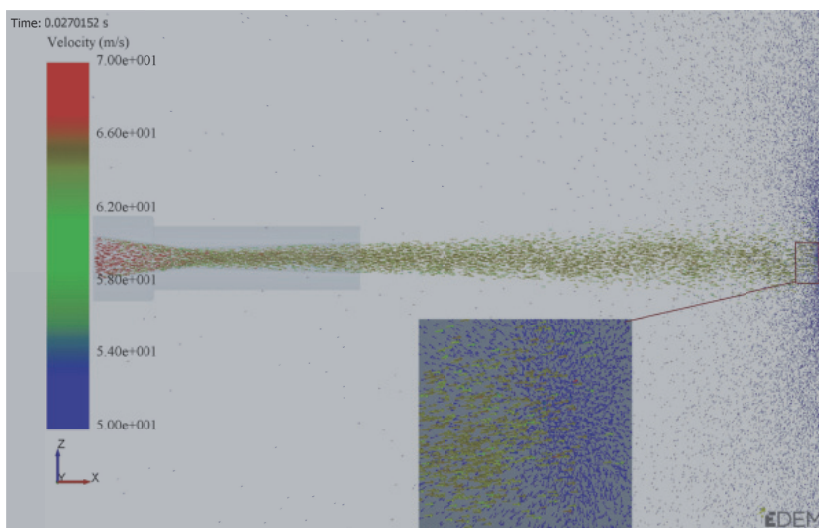


Рис. 4. Модель движения смеси воздуха с микрочастицами

ления размера эффективного пятна контакта от ядра струи, сопоставлена с экспериментальными результатами, полученными на автоматизированной, оснащённой роботом струйно-абразивной установке.

Из отверстий сопла диаметров 8 мм и 10 мм, удалённых от плоского экрана на различные расстояния, под прямым углом выстреливался пучок смеси. Полученные отпечатки позволили заключить, что структура компактного участка, где сохраняется начальная скорость, представляет собой расширяющуюся под таким же двусторонним углом $\beta \approx 6^\circ$ часть струи, образующую ядро диаметра $d_{\text{я}} > d_0$, с более интенсивным воздействием на поверхность. Надо отметить, что размеры ядра в месте падения струи изменяются в зависимости от формы и расположения обрабатываемой поверхности относительно аэродинамической оси.

При скорости истечения воздуха $v_0 = 70$ м/с и диаметре отверстия $d_0 = 8$ мм средняя расходная масса воздуха составляла $Q_{\text{возд}} = 0,0036$ кг/с, расходная масса стальной микродроби (плотность $\rho = 7850$ кг/мм³) на один эжектор – $Q_{\text{др}} = 12,5$ кг/мин = 0,208 кг/с. При этом объёмный расход воздуха равнялся $Q_{\text{возд}}^{\text{об}} = 2,78 \cdot 10^{-3}$ м³/с, объёмный расход микродроби – $Q_{\text{др}}^{\text{об}} = 2,65 \cdot 10^{-5}$ м³/с. Даже при таком существенном массовом расходе $Q_{\text{др}}$ объёмная концентрация микрочастиц в объёме выбрасываемого воздуха не превышает 1%. В практике обработки титановых сплавов используется даже расход $Q_{\text{др}} = 4,5$ кг/мин = 0,075 кг/с [3].

В таких случаях поток можно считать разреженным, а движение его расходной массы оценивать движением одной из её материальных частиц. Ниже рассматривается наиболее общий случай движения находящейся на оси потока микрочастицы М в произвольном направлении, заданном углом γ (рис. 5).

На рисунке линия $O - I$ – ось потока, линия $O - II$ – предполагаемая траектория полёта. Зона, заштрихованная в клетку с примыкающей к ней зоной, образуемой углами β , составляет ядро струи. Сила сопротивления P_c , оказываемого окружающим воздухом, принимается переменной по направлению и равна

$$P_c = 0,5 \rho_a F \zeta v^2,$$

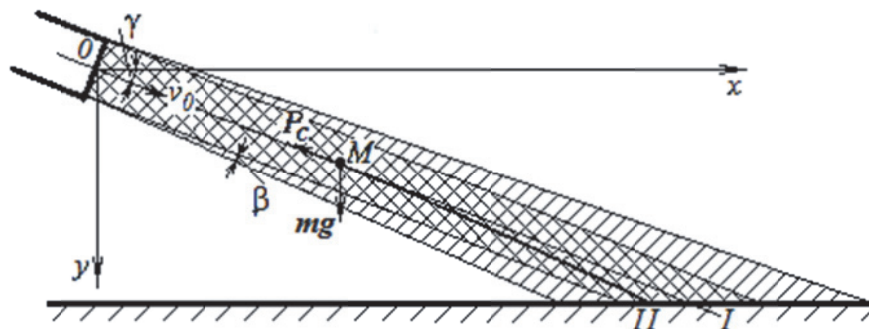


Рис. 5. Расчётная схема движения микрочастицы в воздушной струе

где $\rho_a = 1,293$ кг/м³ – плотность воздуха; F – площадь миделевого сечения микрошарика диаметра $6 \cdot 10^{-4}$ м; $\zeta = 0,47$ – коэффициент лобового сопротивления для частицы сферической формы.

Анализ движения точки М массой m , расположенной на аэродинамической оси произведём с помощью уравнений динамики, осуществив замену переменной dt соответственно на dx и dy . Имеем

- по горизонтальной оси x

$$m \frac{dv_x}{dt} = -0,5 \rho_a F \zeta v_x^2, \Rightarrow \frac{1}{2} \frac{d(v_x^2)}{dx} = -\frac{k \zeta}{m} v_x^2;$$

- по вертикальной оси y

$$m \frac{dv_y}{dt} = mg - 0,5 \rho_a F \zeta v_y^2, \Rightarrow \frac{1}{2} \frac{d(v_y^2)}{dy} = g - \frac{k \zeta}{m} v_y^2,$$

где $k = 0,5 \rho_a$ – постоянный коэффициент; v_x и v_y – проекции текущей скорости соответственно на координатные оси x и y .

После разделения переменных и интегрирования в выбранных пределах от i до $i + 1$ ($i = 0; 1; 2 \dots n$) соответственно получим нелинейные равенства:

$$v_{x_{i+1}} = v_{x_i} \sqrt{e^{-\frac{2k\zeta}{m}(x_{i+1}-x_i)}},$$

$$v_{y_{i+1}} = \sqrt{\frac{m}{k\zeta} \left[g - \left(g - \frac{k\zeta}{m} \cdot v_{y_i}^2 \right) e^{-\frac{2k\zeta}{m}(y_{i+1}-y_i)} \right]},$$

где $v_{x_{i+1}}$ и $v_{y_{i+1}}$ – проекции скоростей на концах отрезков соответственно на координатные оси x и y .

Решение нелинейных уравнений производится методом простых итераций. Приведённые зависимости, как показывает анализ уравнений и практика использования процесса, могут быть аппроксимированы линейными отрезками. Начальные условия движения дроби на выходе из сопла: $x_0 = 0, v_{x_0} = v_0 \cdot \cos \gamma_0; y_0 = 0, v_{y_0} = v_0 \cdot \sin \gamma_0$. При принятом постоянном значении $(x_{i+1} - x_i)$ (или $y_{i+1} - y_i$) соответствующий ему отрезок по оси y определялся по формуле $y_{i+1} - y_i =$

Таблица. Значения скоростей дробинки на различном удалении от сопла

y, мм	0	15	30	45	60	75	90	105	120
$d = 0,6 \text{ мм}, \gamma_0 = 90^\circ$									
$v = v_y,$ м/с	70	69,9	69,8	69,7	69,6	69,5	69,4	69,3	69,2
$d = 2 \text{ мм}, \gamma_0 = 90^\circ$									
$v = v_y,$ м/с	70	69,97	69,94	69,91	69,88	69,85	69,82	69,8	69,77
$d = 0,6 \text{ мм}, \gamma_0 = 6^\circ$									
S, мм	0	15,08	30,16	45,24	60,32	75,4	90,48	105,56	120,64
v, м/с	70	69,9	69,8	69,7	69,6	69,5	69,4	69,3	69,2

$$(x_{i+1} - \tilde{\delta}_i) \cdot (v_{yi+1} / v_{xi+1}) = (x_{i+1} - \tilde{\delta}_i) \cdot \operatorname{tg} \gamma_{i+1}$$

. С удалением микрочастицы от сопла на каждом последующем отрезке длиной $S_{i+1} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$ полная скорость оси струи вычислялась по формуле $v_{i+1} = \sqrt{v_{xi+1}^2 + v_{yi+1}^2}$.

В таблице приведены в качестве сравнительного примера результаты расчёта полной скорости движения дроби диаметра 0,6 мм и 2 мм при начальной скорости 70 м/с. Расстояние до поверхности $S = y$ и $S = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$ выбрано в пределах, применяемых при пневмодробеструйной обработке.

С такими же скоростями v_{i+1} движется дробица $d = 0,6 \text{ мм}$, выпущенная из сопла под другими углами, в том числе под углом $\gamma_0 = 6^\circ$. Как показывают расчёты, точка М с текущими координатами (180; 1,6) мм движется под углом $6^\circ 07'$ к оси x, т.е. фактически продолжает перемещаться по прямой линии при неизменяемом угле γ .

Данные таблицы показывают, что шарик диаметра $d = 2 \text{ мм}$ за счёт большей массы движется быстрее микрочастицы диаметра $d = 0,6 \text{ мм}$. Движение микрочастиц похоже на поведение дробинки, выпущенных из пневматического оружия.

Подробное рассмотрение структуры струи позволяет выявить действующие на обрабатываемую деталь силы, а также определить разме-

ры пятна контакта микрочастиц, составляющих ядро, с обрабатываемым участком поверхности. Для анализа динамического воздействия на поверхность (рис. 6) струю микрочастиц предлагается рассматривать как текучую среду с установившимся движением, при котором в каждой её точке скорость v , давление p и плотность ρ не изменяются со временем.

Сопло показано в произвольном положении. Экран находится на расстоянии, меньшем длины компактной струи. Струя микрочастиц имеет форму усечённого конуса с углом 2β (на рисунке угол не показан) и осью удара $N - N$. Передача давления на тело происходит на участке растекания по обрабатываемой поверхности. При углах $\gamma \neq 90^\circ$ поток, падающий на плоскость, течёт в направлении положительных проекций скоростей на ось x, т.е. в направлении наименьшего сопротивления. Реакция R – сила, с которой поверхность действует на набегающий поток микрочастиц. Направление действия реакции определяет угол ϕ .

Обозначим количество движения секундной массы микрочастиц в начальный момент времени численно равным массовому расходу $Q_{др} =$

$$\rho F_0 v_0 = \rho \frac{\pi d_0^2}{4} v_0, \quad \text{тогда при растекании струи}$$

частиц по обрабатываемой поверхности количество движения в круговом сечении 1 - 1 будет $m_1 v_1$.

Для определения силы R воспользуемся теоремой об изменении количества движения в

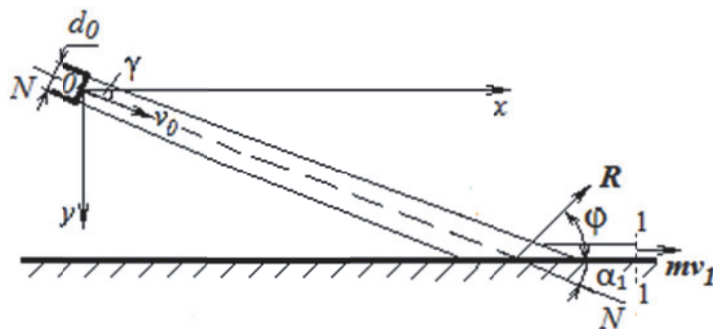


Рис. 6. Схема к расчёту динамического давления на плоскую поверхность

ном участке траектории полёта практически с сохраняемой неизменной скоростью.

Ядро струи, в котором отмечается наиболее высокая скорость движения микрочастиц, можно представить конической поверхностью с границей, заданной двусторонним углом, равным 6° , что позволяет определять размеры отпечатка на обрабатываемой поверхности и находить величину оказываемого микрочастицами давления.

Приведённая методика расчёта позволяет установить геометрические, кинематические и динамические характеристики контакта микрочастиц с поверхностями различного профиля и формы и аналитически связать между собой технологические параметры обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, Н.Д. Технологические методы повышения надёжности деталей машин: Справочник/ Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков. – М.: Машиностроение, 1992. - 304 с.
2. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика Текст. / Г. Н. Александров. М.: Наука. - 1976. - 432 с.
3. Букатый А.С. Оптимизация технологических процессов по остаточным напряжениям с целью обеспечения адгезии покрытий никеля и хрома на деталях из титановых сплавов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т.17. № 3. С. 138 – 147.

MOVEMENT OF MICROPARTICLES IN THE AIR FLOW DURING PNEUMATIC SHOT BLASTING

© 2020 Y.I. Kurguzov, D.A. Lushna

Samara State Technical University

Examined the movement of microparticles in the air flow aimed at a flat shielding surface. The structure of the unsinkable jet has been refined, the core of the jet with its geometric, kinetic and dynamic parameters, reproduced on the treated surface, has been highlighted.

Keywords: flooded free air jet, unsinkable jet, jet structure, jet core, microparticle movement equations, speed, mass seconds, microparticle jet pressure, fingerprint area, pressure distribution.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-120-126

Yuri Kurguzov, Candidate of Technics, Associate Professor at Mechanical Engineering, Metal Cutting Machines and Tools.

E-mail: tms@samgtu.ru

Dmitry Lushna, Graduated Student at Mechanical Engineering, Metal Cutting Machines and Tools.

E-mail: tms@samgtu.ru