

УДК 621.921

А.А. Андилахай, доцент, канд. техн. наук

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет

ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, Украина, 87500

andilahay@mail.ru

СКОРОСТЬ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ЗАТОПЛЕННЫМИ СТРУЯМИ

Рассматривается способ абразивной обработки деталей струями сжатого воздуха, затопленными в абразивной суспензии. Важнейшим параметром струйно-абразивной обработки является кинетическая энергия абразивных частиц, и, в частности, их скорость.

Ключевые слова: *скорость абразивных частиц, сжатый воздух, струйно-абразивная обработка, канал сопла.*

Способ получения декоративной поверхности с помощью струй сжатого воздуха, затопленных абразивной суспензией [1] отличается от аналогичных способов тем, что абразивный материал, находящийся в составе абразивной суспензии, присоединяется к струе сжатого воздуха за пределами сопла, а не прокачивается через него, что, как правило, приводит к быстрому износу, прежде всего, канала сопла.

Поскольку при струйно-абразивной обработке используется свободный зернистый абразив, полностью исключаются прижоги, температурные и силовые деформации обрабатываемых деталей.

Управляя скоростью и концентрацией абразивных частиц в несущей их воздушной струе, можно получить не только декоративную поверхность, но и очистить ее от окисной пленки, окалины, коррозии, лакокрасочных покрытий, удалить заусенцы, скруглить острые кромки, исключить образование бликов, благодаря образованию матовой поверхности, упрочнить поверхностный слой, подготовить поверхности под гальванопокрытия.

Привлекательной стороной струйно-абразивной обработки затопленными струями является высокая стойкость воздушных сопел, возможность применения для обработки деталей сложной пространственной формы, непрерывность процесса, управляемость процессом и простота технологического оборудования. Однако для её внедрения в производство необходимо всестороннее исследование закономерностей формирования воздушно-абразивной струи.

Воздушно-абразивная струя, затопленная в абразивной суспензии, относится к гетерогенной динамической среде, к классу водо-воздушно-абразивные взвеси, основной особенностью которого является совместное движение воздушной среды, капель жидкости и распределенных в ней абразивных частиц. При этом воздушная фаза является несущей средой, её движение определяет движение абразивных зерен и капель жидкости.

Целью данного исследования является оценка запаса кинетической энергии, сообщенной абразивным зернам в процессе струйно-абразивной обработки.

Технологические характеристики струи определяются ее обрабатывающей способностью, зависящей от кинетической энергии удара абразивных частиц, концентрации, а также их режущей способностью.

Поскольку масса абразивных зерен в процессе обработки неизменна, целесообразным является достижение максимально возможной скорости частиц, от которых зависит глубина отпечатков на обрабатываемой поверхности. Определив глубину отпечатков, задавшись размером абразивных частиц и зная твердость обрабатываемого материала, можно определить скорость воздуха, необходимую для получения заданной скорости удара абразивной частицы, достаточной для формообразования лунок требуемой глубины [2].

Скорость абразивных частиц, необходимая для получения рельефа заданных размеров, является одной из основных технологических характеристик и определяется из формулы (1).

Для приближенного расчета движения твердых частиц в потоке газа автором [3] вводятся следующие допущения:

- частицы имеют сферическую форму и одинаковый диаметр;
- частицы не взаимодействуют между собой;
- вязкость воздуха не учитывается.

С учетом принятых допущений, автором [3] получена формула (1) для расчета скорости частицы на срезе технологического сопла.

$$V_{абраз} = V_{возд} \sqrt{\frac{3}{2} C_x \frac{\rho_{возд} l}{\rho_{абраз} D}}, \quad (1)$$

где $V_{абраз}$ – скорость частицы на срезе сопла, (м/с); $V_{возд}$ – скорость сжатого воздуха, (м/с); C_x – коэффициент сопротивления; $\rho_{возд}$ – плотность воздушной фазы, (кг/м³); $\rho_{абраз}$ – плотность абразивного материала, (кг/м³); l – длина технологического сопла, (м); D – размер абразивного зерна (м).

В отличие от рассмотренных в работе [3] сферических частиц абразивные частицы вследствие их неправильной формы и возможного вращения в разных направлениях при расчетах по формуле (1) дают значение скорости абразивных частиц, заниженное 2,5 раза.

Введение экспериментального коэффициента в формулу (1) позволяет повысить точность расчета скорости:

$$V_{абраз} = kV_{возд} \sqrt{\frac{3}{2} C_x \frac{\rho_{возд} l}{\rho_{абраз} D}}, \quad (2)$$

где $k = 2,5$ – экспериментальный коэффициент для абразивных частиц зернистостью 40...63 ($D=400\ldots630$ мкм). Формула (2) дает значение скорости частицы на выходе из сопла, тогда как обработка ведется на расстоянии 20 – 60 мм от среза сопла, в пределах начального участка струи.

Характер изменения скорости частиц по мере удаления от сопла в безразмерных координатах представлен на рисунок 1.

Как следует из рисунка 1, [3] чем меньше диаметр частиц, тем более интенсивно падение их скорости.

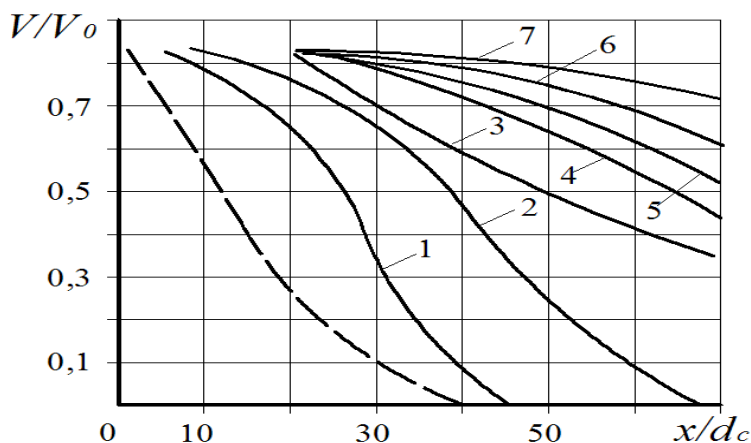


Рисунок 1 – Изменение продольной составляющей скорости сжатого воздуха (пунктир) и твердых частиц магния: (1) – $D = 0,05$ мм; (2) – 0,1; (3) – 0,2; (4) – 0,4; (5) – 0,5; (6) – 0,8; (7) – 1,6. x – расстояние от среза технологического сопла, d_c – диаметр технологического сопла; V – осевая скорость частицы по длине струи; V_0 – осевая скорость частицы на выходе из технологического сопла.

Плотность частиц абразива в 2 раза больше плотности магния, для оценки скорости абразивного зерна необходимо ввести соответствующую корректировку при использовании данных, приведенных на рисунок 1. Например, у частицы с размером $D=0,05$ мм (кривая 1) падение скорости для абразивных частиц будет соответствовать падению скорости частицы магния с размером $D=0,1$ мм (кривая 2) и т.д. [3].

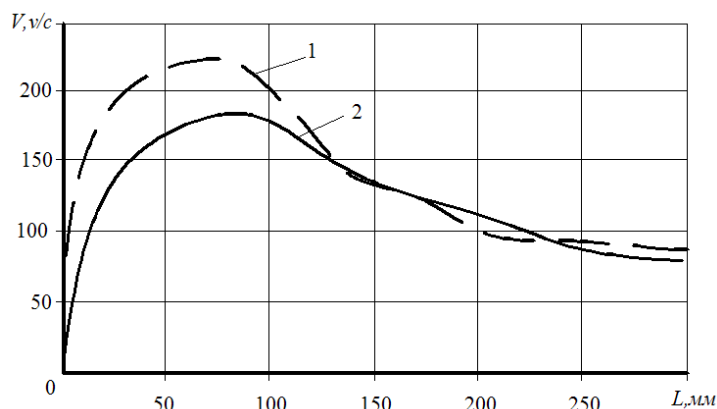


Рисунок 2 – Изменение продольной составляющей скорости газа (1) (пунктир) и твердых частиц (2).

Особенностью струйно-абразивной обработки затопленными струями является то, что в момент присоединения абразивной частицы к струе сжатого воздуха ее скорость равна нулю. В то же время скорость воздушной струи максимальна. Под действием воздушного потока частица быстро разгоняется и ее скорость приближается к скорости воздушной струи.

Оригинальный способ определения скорости удара абразивных частиц представлен в работе [2], автором использовался метод обращенного движения: определялась скорость удара не абразивных частиц по неподвижному образцу, а образца по неподвижным в направлении его вращения абразивным частицам.

Скорость удара V_0 находилась путем её непосредственного измерения с помощью вращения контрольного образца, относительно его центра, выполненного из того же материала, что и обрабатываемая деталь. Абразивные частицы подавались в зону вращения образца перпендикулярно плоскости его вращения, подвергаясь удару со скоростью, равной линейной скорости движения этой части образца. Образовавшиеся лунки, полученные при различных скоростях вращения образца, сравнивались с подобными лунками, полученными при струйно-абразивной обработке, на основании чего определяли скорость абразивных частиц. Очевидно, что описанный способ приемлем для определения скорости частиц сферической формы и относительно невысоких скоростей ограниченных возможностью вращения образца.

Однако для получения сверхзвуковых потоков газа его ускорение производится в сверхзвуковых соплах – соплах Лавала, включающих сужающуюся и расширяющуюся части. При этом в критическом (самом узком) сечении сопла скорость газа равна значению локальной скорости звука, а в расширяющейся выходной части сопла она может в несколько раз превышать скорость звука.

Таблица 1 – Значение скоростей звука для некоторых газов [3]

Газ	Скорость звука, м/с	Адиабатическая постоянная	Молярная масса, г/моль	Плотность, кг/м ³
Воздух	331	1,40	29	1,29
Азот	334	1,40	28	1,25
Неон	435	1,66	20	0,90
Гелий	965	1,66	4	0,18
Водород	1284	1,40	2	0,09

Из таблицы видно, что высокие скорости газового потока достигаются при использовании гелия, в отличие от обычного воздуха. Именно поэтому для струйно-абразивной обработки предпочтительно использовать гелий или его смесь с воздухом.

Вместе с тем невысокая плотность гелия не обеспечит быстрый разгон частиц абразивного материала, что даже при самой высокой скорости газового потока не повысит производительность обработки из-за небольшого запаса кинетической энергии, сообщенной абразивным зернам.

В газовом потоке ускорение $a_{абр}$ абразивной частицы может быть определено по формуле [4]:

$$a_{абр} = \frac{C_{абр} S_{абр} \rho_{газ} (V_{газ} - V_{абр})}{2m_{абр}}, \quad (3)$$

где $m_{абр}$ – масса абразивной частицы; $C_{абр}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления абразивной частицы; $S_{абр}$ – площадь эффективного сечения абразивной частицы; $\rho_{газ}$ – плотность ускоряющего газового потока; $V_{газ}$ – скорость газового потока; $V_{абр}$ – скорость абразивной частицы.

Определение оптимальных параметров сопел является одним из наиболее важных направлений исследований процесса струйно-абразивной обработки затопленными струями.

Из формулы (3) следует, что масса, размер и форма абразивных частиц оказывают значительное влияние на возможность их ускорения несущим потоком.

Естественно, чем легче частицы, тем быстрее они достигают высокой скорости. Однако после выхода из сопла происходит торможение ускоренных частиц в приграничном слое обрабатываемой детали. Для легких частиц это ведет к резкому снижению скорости при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью. В то же время, чем массивнее абразивные частицы, тем хуже они разгоняются потоком, но тем лучше сохраняют скорость при приближении к обрабатываемой поверхности. В связи с этим соотношение плотности материала абразивных частиц, их размера и формы является важным фактором для оптимизации процесса струйно-абразивной обработки.

Наиболее точным способом и прибором измерения скорости абразивных частиц, не вносящим каких-либо возмущений в поток, является лазерный доплеровский анемометр (ЛДА).

Упомянутый выше способ требует специальной дорогостоящей аппаратуры, но не позволяет распознавать скорости абразивных частиц, движущихся в центре струи и по мере удаления на периферию.

В данной работе скорость абразивных частиц определяли с помощью вращающегося с заданной скоростью цилиндра 1 (рисунок 3) с отверстием 2, внутренний диаметр которого представляет собой расстояние L от среза сопла до обрабатываемой поверхности. Внутри цилиндра 1 установлен неподвижно плоский раструб 3 на кронштейне 4 так, что ось его симметрии совпадает с осью пневматического сопла 5. Над срезом сопла установлена воронка с абразивными частицами 6. На противоположной по отношению к отверстию внутренней поверхности цилиндра расположен экран 7 с липким слоем для улавливания абразивных частиц.

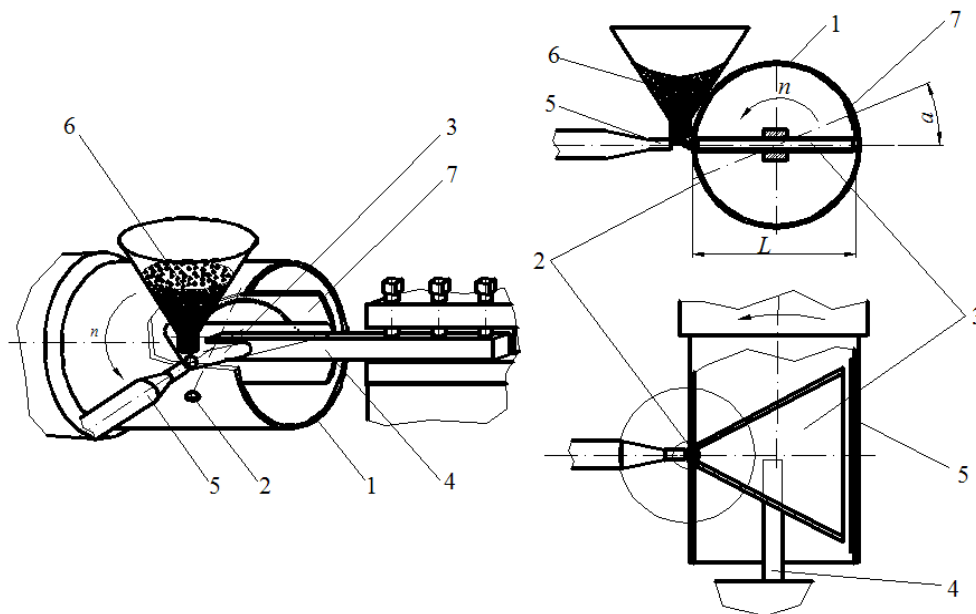


Рисунок 3 – Устройство для определения скорости абразивных частиц в струе сжатого воздуха.

Эксперименты проводили на базе токарного станка с различными диаметрами цилиндров и соответствующими размерами раструбов.

Цилиндр с отверстием закрепляли в трехкулачковом самоцентрирующем патроне, сопло и воронку с абразивным порошком – в резцедержателе, плоский раструб – в пиноли задней бабки. Пневматическое сопло совмещали с радиальным отверстием в цилиндре и осью симметрии плоского раструба. Цилиндр задавали определенную частоту вращения, через сопло подавали сжатый воздух, а из воронки подавали абразивный материал.

В моменты совпадения отверстия цилиндра с отверстиями сопла и плоского раструба порция абразивных частиц проходит длину раструба и, достигнув противоположной внутренней липкой поверхности цилиндра, остается на ней. За время прохождения абразивной частицей диаметра цилиндра (внутри неподвижного раструба) он провернется на некоторый угол α . Величина угла α в совокупности с известными частотой вращения цилиндра n и его диаметром L позволяют определить среднюю скорость абразивных частиц на участке от среза сопла до противоположной стенки цилиндра, т. е. на участке L .

$$t = \frac{L_{\text{цил}}}{V_{\text{абр}}} = \frac{l_{\text{дуги}}}{V_{\text{цил}}}, \quad (4)$$

где t – время полета абразивной частицы внутри цилиндра, поворота цилиндра на угол α ; $L_{\text{цил}}$ – путь L полета абразивной частицы внутри цилиндра; $V_{\text{абр}}$ – средняя скорость абразивной частицы на пути L ; $l_{\text{дуги}}$ – длина дуги поворота цилиндра, соответствующая углу α ; $V_{\text{цил}}$ – линейная скорость цилиндра.

Выразив $l_{\text{дуги}}$ и $V_{\text{цил}}$ через известные формулы, получим:

$$\frac{L_{\text{цил}}}{V_{\text{абр}}} = \frac{\frac{\pi L \alpha}{360^\circ}}{\frac{\pi L_{\text{цил}} n}{1000}} = \frac{360^\circ L_{\text{цил}} n}{1000 \alpha}, \quad (5)$$

где n – частота вращения цилиндра.

Тогда средняя скорость абразивной частицы выразится следующей формулой:

$$V_{\text{абр}} = \frac{360^\circ L_{\text{цил}} n}{1000 a^\circ},$$

На рисунок 4 представлен график изменения средней скорости абразивных частиц в трехмерном пространстве по мере удаления от среза сопла в диапазоне от 20 до 80 мм. по оси струи и по мере удаления от середины на периферию струи.

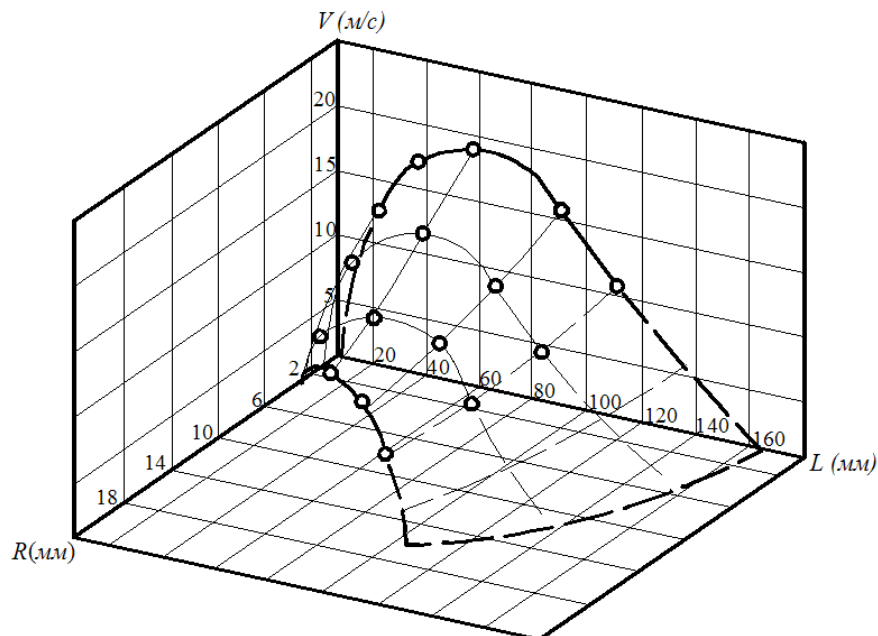


Рисунок 4 – Изменение скорости V абразивных зерен, присоединенных к струе сжатого воздуха по мере удаления L от среза сопла и от осевого сечения R . Давление сжатого воздуха 0,4 МПа, диаметр сопла 2 мм. Штриховые линии графика построены экстраполяцией.

Скорости абразивных частиц центральной части струи получены на основе следующих рассуждений.

Поскольку абразивные частицы присоединяются к струе сжатого воздуха после среза сопла, их начальная скорость равна нулю. Основываясь на ранее приведенных данных, полагая, что на начальном участке абразивные частицы движутся равноускоренно, среднюю скорость определяли из известной формулы:

$$V_{\text{cp}} = \frac{V_0 + V}{2}, \quad (6)$$

тогда с учетом нулевой начальной скорости абразивной частицы к моменту столкновения конечная скорость составит:

$$V = 2V_{\text{cp}}.$$

В последующих сечениях среднюю скорость определяли, обрабатывая экспериментальные данные, полученные по результатам опытов на цилиндрах с диаметрами: 20, 40, 60, 80 мм.

Средняя скорость на участках:

от 0 до 20 $V_{\text{cp}} = 10$ м/с;

от 0 до 40 $V_{\text{cp},40} = 11,6$ м/с;

Среднюю скорость на участке от 20 до 40 определяли из предыдущего и следующего за ним опыта:

$$V_{\text{cp},40} = \frac{V_{20} + V_{\text{х},40}}{2}; \quad (7)$$

$$2V_{\text{cp},40} - V_{20} = V_{\text{х},40}$$

$$2 \times 11,6 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с} = 13,2 \text{ м/с};$$

от 0 до 60 $V_{\text{cp},60} = 12,3$ м/с;

Среднюю скорость на участке от 40 – 60 определяли аналогично предыдущему опыту:

$$V_{cp.60} = \frac{V_{40} + V_{x.60}}{2}; \quad (8)$$

$$2V_{cp.60} - V_{40} = V_{x.60}$$

$$2 \times 12,3 \text{ м/с} - 11,6 \text{ м/с} = 13 \text{ м/с};$$

от 0 до 80 $V_{cp.80} = 9 \text{ м/с}$

Среднюю скорость на участке от 60 – 80 так же используя предыдущие данные:

$$V_{cp.80} = \frac{V_{60} + V_{x.80}}{2};$$

$$2V_{cp.80} - V_{60} = V_{x.80}$$

$$2 \times 9 \text{ м/с} - 12,3 \text{ м/с} = 5,7 \text{ м/с};$$

Аналогично выполнены расчеты для продольных сечений струи, по мере удаления от оси в радиальном направлении в пределах плоского раструба.

Полученные результаты свидетельствуют о значительной разнице в скоростях абразивных частиц, прокачиваемых через сопло и частиц, присоединяемых к струе, затопленной абразивной суспензией, а следовательно и о кинетической энергии, сообщаемой частицам в первом и втором способах струйно-абразивной обработки. Однако скорость абразивных частиц в струе, затопленной абразивной суспензией можно увеличить благодаря использованию сжатого воздуха высокого давления, поскольку такое увеличение не приведет к повышенному износу канала сопла.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Анділахай А.А. Абразивна обробка деталей затопленими струями / А.А. Анділахай. — Мариуполь: ПГТУ, 2006. — 190 с.
2. Исупов М.Г. Разработка и исследование технологии струйно-абразивной финишной обработки: автореф. дис... д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / М.Г. Исупов. — Ижевск, 2006. — 32 с.
3. Кудинов В.В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В.В. Кудинов, В.Н. Иванов. — М.: Машиностроение, 1981. — 190 с.
4. Алхимов А.П. Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления / А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, А.Н. Папырин // ПМТФ. — 1998. — № 2. — С. 182–188.

Поступила в редакцию 13.03.2012 г.

Анділахай О.О. Швидкість абразивних часток у процесі струменево-абразивної обробки деталей затопленими струменями

Розглядається спосіб абразивної обробки деталей струменями стисненого повітря, затопленими в абразивній суспензії. Найважливішим параметром струменево-абразивної обробки є кінетична енергія абразивних частинок, і, зокрема, їх швидкість.

Ключові слова: швидкість абразивних частинок, стиснене повітря, струменево-абразивна обробка, канал сопла.

Andilahay A.A. Rate of abrasive particles in abrasive blasting parts submerged jet.

Considered is the way of abrasive machining jets of compressed air submerged in an abrasive slurry. The most important parameter abrasive blasting is kinetic energy of abrasive particles, and, in particular, their speed.

Keywords: speed of the abrasive particles, compressed air, abrasive blasting, the channel nozzle.