

МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МЕТАЛООБРОБКА

УДК 621.923

©Андилахай А.А.*

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА, ИНЖЕКТИРОВАННОГО В СТРУЮ СЖАТОГО ВОЗДУХА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ СОПЛА В СУСПЕНЗИЮ

Рассматривается способ абразивной обработки деталей струями сжатого воздуха, затопленными в абразивной суспензии. Важнейшим параметром струйно-абразивной обработки является кинетическая энергия абразивных частиц, бомбардирующих обрабатываемую поверхность.

Ключевые слова: кинетическая энергия, скорость абразивных зерен, сжатый воздух, струйно-абразивная обработка, канал сопла, абразивная суспензия.

Андилахай О.О. Кінетична енергія абразивного зерна, яке інжектровано в струмінь стисненого повітря при витеканні з сопла у суспензію. Розглядається спосіб абразивної обробки деталей струменями стисненого повітря, затопленими в абразивній суспензії. Найважливішим параметром струменево-абразивної обробки є кінетична енергія абразивних частинок, які бомбардують оброблювану поверхню.

Ключові слова: кінетична енергія, швидкість абразивних зерен, стиснене повітря, струменево-абразивна обробка, канал сопла, абразивна суспензія.

O.O. Andilayah. Kinetic energy of abrasive grain, injected into the jet of compressed air at its flow into the expiration. Investigated was the way of abrasive machining jets of compressed air, submerged in an abrasive suspension. Kinetic energy of abrasive particles, bombarding the surface being treated was found to be the most important parameter of jet abrasive treatment.

Keywords: kinetic energy, rate of abrasive grains, compressed air, abrasive treatment blasting, nozzle channel, abrasive suspension.

Постановка проблемы. Струйно-абразивная обработка поверхностей 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.

Сообщая кинетическую энергию абразивным зернам несущей их воздушной струей, 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 [2].

Наряду с возможностью применения этого метода для обработки деталей сложной пространственной формы, возможной непрерывностью и управляемостью процессом, простотой используемого технологического оборудования, привлекательной стороной струйно-абразивной обработки затопленными струями является высокая стойкость воздушных сопел [1]. Однако для её внедрения в производство необходимо всестороннее исследование законо-

* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

мерностей формирования воздушно-абразивной струи, сообщения ею абразивным зернам запаса кинетической энергии, достаточной для выполнения работы резания, смятия, изнашивания, т. е. образования новой поверхности.

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 зерен. 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.

Изложение основного материала. Технологические возможности струи определяются ее обрабатывающей способностью, зависящей от кинетической энергии, концентрации и конфигурации абразивных зерен. Кинетическая энергия единичного абразивного зерна определяется общеизвестной зависимостью:

$$T = \frac{mV_{абраз}^2}{2},$$

где T – кинетическая энергия поступательного движения абразивного зерна;

m – масса абразивного зерна;

$V_{абраз}$ – скорость поступательного движения абразивного зерна.

Поскольку масса абразивных зерен в процессе обработки неизменна, целесообразным является определение условий и достижение максимально возможной скорости абразивных зерен.

Для решения поставленной задачи необходимо выявить метод измерения скорости абразивных зерен, движущихся в струе сжатого воздуха.

Одним из таких методов является косвенная оценка скорости абразивных зерен, от которой зависит глубина отпечатков на обрабатываемой поверхности.

Определив глубину отпечатков, задавшись массой абразивных частиц и зная твердость обрабатываемого материала, можно определить скорость удара абразивной частицы, достаточную для формообразования лунок требуемой глубины [2].

С учетом формулы, предложенной автором [3] для расчета скорости частицы на срезе технологического сопла, кинетическая энергия абразивного зерна может быть определена из формулы:

$$\dot{Q}_{абраз} = \frac{mV_{возд}^2 \frac{3}{2} C_x \frac{\rho_{абраз} l}{\rho_{возд} D}}{2}, \quad (1)$$

где $T_{абраз}$ – кинетическая энергия абразивного зерна на срезе сопла, (Дж);

$V_{возд}$ – скорость сжатого воздуха, (м/с);

C_x – коэффициент сопротивления среды движению абразивного зерна;

$\rho_{возд}$ – 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 ~ в 2 раза [2].

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

$$T_{абраз} = m \times V_{абраз}^2 \frac{3}{2} C_x \frac{\rho_{абраз} l}{\rho_{абраз} D}. \quad (2)$$

Формула (2) дает значение кинетической энергии абразивного зерна на выходе из сопла, тогда как обработка ведется на расстоянии 20-70 мм от среза сопла, в пределах начального участка струи.

Особенностью струйно-абразивной обработки затопленными струями является то, что в

момент присоединения абразивного зерна к струе сжатого воздуха его скорость равна нулю. В то же время скорость воздушной струи максимальна. Под действием воздушного потока абразивное зерно быстро разгоняется, и его скорость стремится к скорости воздушной струи, см. рис. 1.

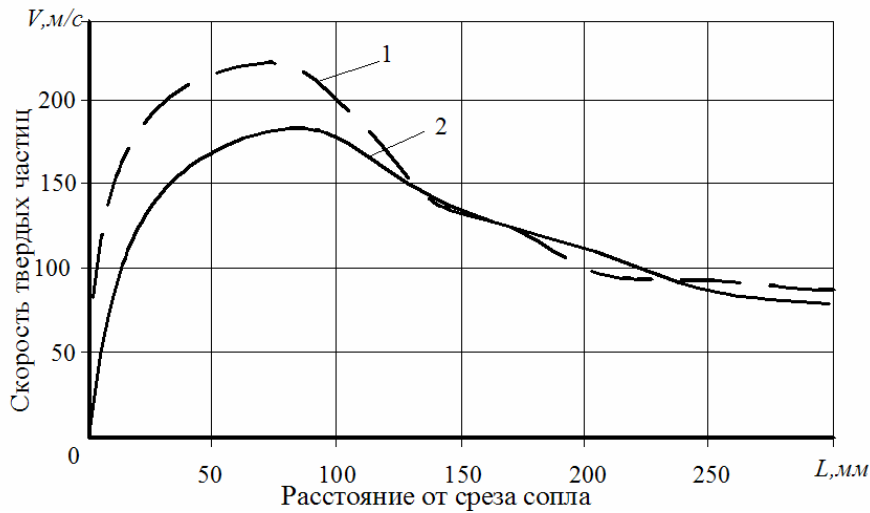


Рис. 1 – Изменение продольной составляющей скорости газа (1) (пунктир) и твердых частиц (2) [3]

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

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 зерна подавались в зону вращения образца перпендикулярно плоскости его вращения, подвергаясь удару со скоростью, равной линейной скорости движения этой части образца. Образовавшиеся лунки на поверхности, полученные при различных скоростях вращения образца, сравнивали с подобными лунками, полученными при струйно-абразивной обработке и на основании этого определяли скорость абразивных зерен. 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 Лавалья, 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. Значения скоростей звука для воздуха и гелия приведены в таблице.

Таблица

Значение скоростей звука для воздуха и гелия [3]

Газ	Скорость звука, м/с	Адиабатическая постоянная	Молярная масса, г/моль	Плотность, кг/м ³
Воздух	331	1,40	29	1,29
Гелий	965	1,66	4	0,18

Из таблицы видно, что высокие скорости газового потока достигаются при использова-

нии 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 $a_{абр}$ абразивного зерна 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 абразивного зерна;

$C_{абр}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления абразивного зерна;

$S_{абр}$ – площадь эффективного сечения абразивного зерна;

$\rho_{газ}$ – плотность ускоряющего газового потока;

$V_{газ}$ – скорость газового потока;

$V_{абр}$ – скорость абразивного зерна.

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 зерен оказывают значительное влияние на возможность их ускорения несущим потоком.

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

Наиболее точным способом и прибором измерения скорости абразивных зерен, 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 зерен, движущихся в центре струи и по мере удаления на периферию.

В излагаемой работе скорость абразивных частиц определяли с помощью вращающегося с заданной скоростью цилиндра 1 (рис. 2) 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 пневматических сменных сопел (5.1-5.6). Над срезом сопла установлена воронка с абразивными частицами (условно не показана). На противоположной по отношению к отверстию внутренней поверхности цилиндра расположен экран 6 с липким слоем для улавливания абразивных частиц.

Эксперименты проводили на базе токарного станка модели Т16 с различными диаметрами цилиндров и соответствующими размерами раструбов.

Цилиндр с отверстием закрепляли в трехкулачковом самоцентрирующем патроне, сопло и воронку с абразивным порошком и плоский раструб – в резцедержателе. Пневматическое сопло совмещали с радиальным отверстием в цилиндре и осью симметрии плоского раструба. Цилиндру 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 зерен проходит длину раструба и, достигнув противоположной внутренней липкой поверхности цилиндра, остается на ней. За время прохождения абразивным зерном 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 зерен на участке от среза сопла до противоположной стенки цилиндра, т. е. на участке L .

$$t = \frac{L_{\text{оєє}}}{V_{\text{аао.нб}}} = \frac{l_{\text{аооє}}}{V_{\text{оєє}}}, \quad (4)$$

где t – время полета абразивного зерна внутри цилиндра, поворота цилиндра на угол α ;
 $L_{\text{цил}}$ – путь L полета абразивного зерна внутри цилиндра;
 $V_{\text{абр.сп}}$ – средняя скорость абразивного зерна 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:

$$\frac{L_{\text{оєє}}}{V_{\text{аао.нб}}} = \frac{\pi La}{360^\circ} = \frac{360^\circ L_{\text{оєє}} n}{1000a}, \quad (5)$$

где n – частота вращения цилиндра.

Тогда средняя скорость абразивного зерна выразится следующей формулой:

$$V_{\text{аао.нб}} = \frac{360^\circ L_{\text{оєє}} n}{1000a}. \quad (6)$$

Подставив значения $L_{\text{цил}} = 40$ мм; $n = 770$ об/мин; $a = 6^\circ$, и разделив на 60 получим в скорость м/с:

$$V_{\text{абр.сп40}} = 30,8 \text{ м/с.}$$

На рис. 3 представлен график изменения средней скорости абразивных зерен 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.

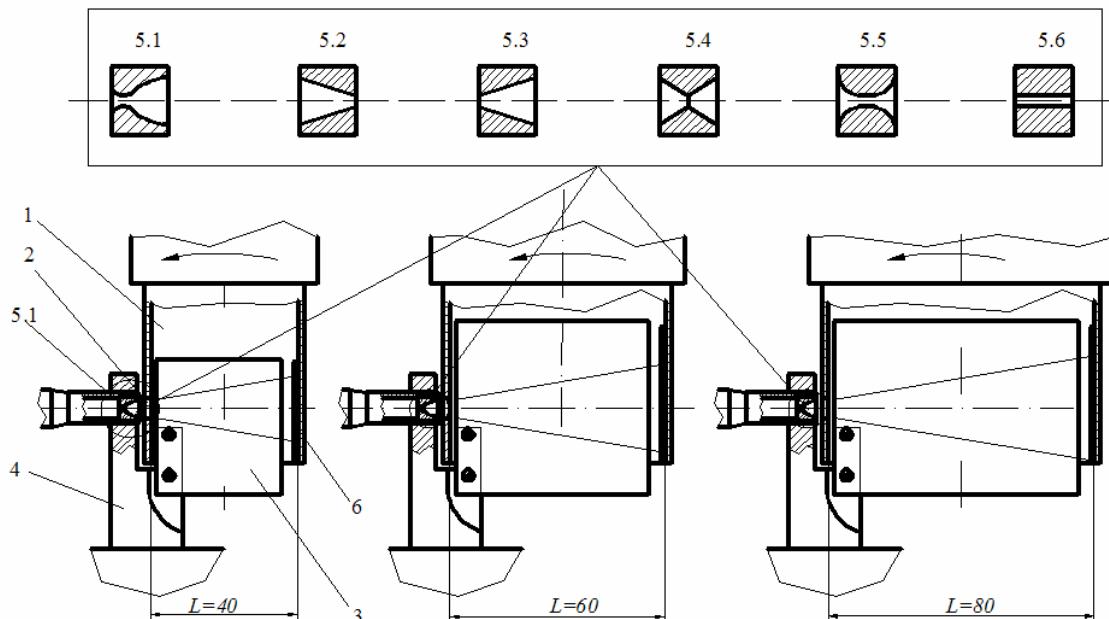


Рис. 2 – Устройство для определения скорости абразивных зерен в струе сжатого воздуха со сменными соплами: 5.1 – сверхзвуковое сопло Лавалья; 5.2 – сопло с прямым конусом; 5.3 – с обратным конусом; 5.4 – двоякорасширяющееся; 5.5 – галтельное; 5.6 – цилиндрическое

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

Поскольку абразивные зерна присоединяются к струе сжатого воздуха после среза сопла, их начальная скорость V_0 равна нулю. Основываясь на ранее приведенных данных и полагая,

что на начальном участке абразивные зерна движутся равноускоренно, со скоростью $V_{абр.ср}$ и достигают конечной скорости V , среднюю скорость определяли из известной формулы:

$$V_{\text{ср}} = \frac{V_0 + V}{2}, \quad (7)$$

тогда с учетом нулевой начальной скорости абразивного зерна к моменту столкновения конечная скорость составит:

$$V = 2V_{\text{абр.ср}}, \\ V = 2 \times 30,8 = 61,6 \text{ м/с.}$$

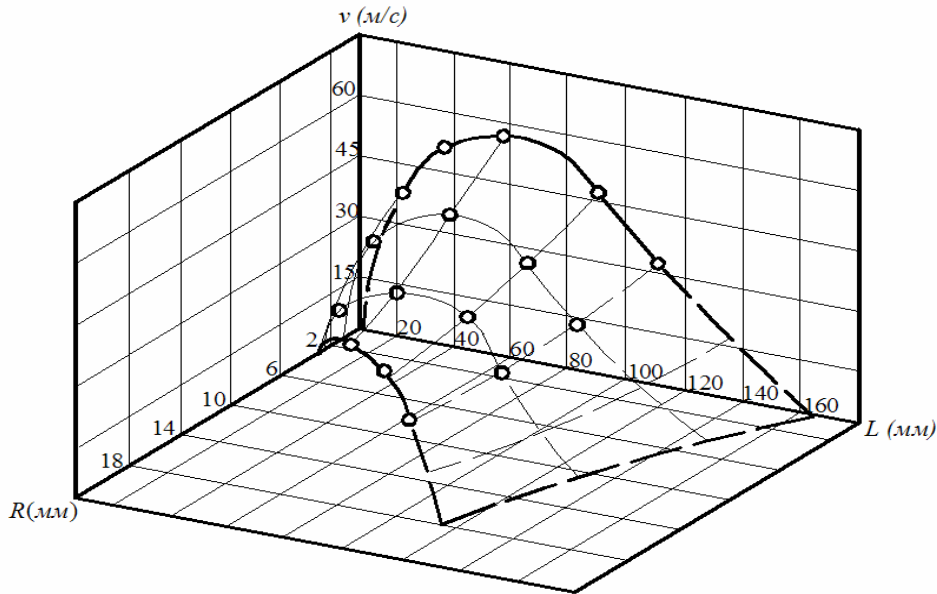


Рис. 3 – Изменение скорости V абразивных зерен, присоединенных к струе сжатого воздуха по мере удаления L от среза сопла и от осевого сечения R . Давление сжатого воздуха 0,5 МПа, диаметр сопла 2 мм. Штриховые линии графика достроены экстраполяцией

В последующих сечениях среднюю скорость определяли, обрабатывая экспериментальные данные, полученные по результатам опытов на цилиндрах с диаметрами: 60, 80 мм. Из-за возможного падения скорости по мере удаления от среза сопла конечную скорость V определять по формуле (7) не представляется возможным.

Средняя скорость на участке: от 0 до 60:

$$V_{\text{ср}} = \frac{360^\circ \times 60 \times 770}{1000 \times 11} = 25,2 \text{ м/с}$$

Время для прохождения абразивным зерном диаметра цилиндра определяли из формулы:

$$t = \frac{L}{V}$$

$$t_{40} = \frac{0,04}{30,8} = 0,00129 \text{ с,}$$

где t_{40} – время прохождения цилиндра диаметром 40 мм.

Время для прохождения абразивным зерном цилиндра диаметром 60 мм

$$t_{60} = \frac{0,06}{25,2} = 0,00238 \text{ с,}$$

тогда время на прохождение участка от 40 до 60 мм определится как разность:

$$t_{40-60} = t_{60} - t_{40} ;$$

$$t_{40-60} = 0,00238 - 0,00129 = 0,0011 ,$$

скорость на участке от 40 до 60 мм определится:

$$V_{40-60} = \frac{0,06 - 0,04}{0,0011} = 18,2 \text{ м / с} .$$

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

Выводы

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

Список использованных источников:

1. Андилахай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андилахай. – Мариуполь : ПГТУ, 2006. – 190 с.
2. Исупов М.Г. Разработка и исследование технологии струйно-абразивной финишной обработки: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. 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.

Bibliography:

1. Andilahay A.A. Abrasive machining of parts submerged jets / A.A. Andilahay. – Mariupol : Priazovskiy State Technical University, 2006. – 190 p. (Rus.)
2. Isupov M.G. Development and research of technology of jet-abrasive finishing: Abstract. Thesis for the scientific. Doctoral degree. Technical. Science: spec. 02.05.08 «Engineering Technology» / Isupov M.G. – Izhevsk, 2006. – 32 p. (Rus.)
3. Kudinov V.V. Application of plasma refractory coatings / V.V. Kudinov, V.N. Ivanov. – Moscow : Mashinostroenie, 1981. – 190 p. (Rus.)
4. Alkhimov A.P. Gas-dynamic spraying. Experimental study of the deposition process. / A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev, A.N. Papyrin // J. Appl. – 1998. – № 2. – P. 182-188. (Rus.)

Рецензент: М.В. Маргулис
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 24.04.2012