

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ СОПЛА ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ ЗАТОПЛЕННЫМИ СТРУЯМИ

Постановка проблемы. Расширение технологических возможностей струйно-абразивной обработки является важным направлением технологии машиностроения, поскольку данный метод позволяет эффективно обрабатывать сложные поверхности деталей машин [1]. С целью устранения основного недостатка метода – повышенного износа сопел и их частой замены – предложено обработку деталей производить затопленными струями в закрытой емкости (рабочей камере), присоединяя абразивные зерна к струе сжатого воздуха за пределами сопла. Это фактически исключает их износ и обеспечивает стабилизацию во времени процесса обработки. Данный метод получил название абразивной обработки затопленными струями и предназначен для обработки мелких деталей массой до 3 г, которые перемешиваются в камере с помощью струй сжатого воздуха, затопленных абразивной суспензией. Как показала практика, процесс обработки деталей длится до 25 минут. В результате происходит их отделочная обработка, включающая обработку кромок заготовок, устранение заусенцев и уменьшение микронеровностей на обрабатываемых поверхностях. На технологические показатели обработки существенное влияние оказывает форма и геометрические размеры сопел. Поэтому важной и актуальной задачей при проектировании установок для абразивной обработки деталей затопленными струями является научно обоснованный выбор оптимальной конструкции сопел по критерию обеспечения наибольшей скорости движения абразивных зерен в момент их соударения с обрабатываемой поверхностью.

Анализ последних исследований и публикаций. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию струйно-абразивной обработки [1-4], вопросам абразивной обработки деталей затопленными струями уделено недостаточно внимания в связи с тем, что этот метод относительно недавно стал известен [5]. Первые работы, посвященные исследованию данного метода, были направлены на установление его технологических возможностей и общих закономерностей, что позволило укрупненно оценить его преимущества и недостатки с по сравнению с известными методами отделочной обработки. Для более полного использования данного метода на практике, несомненно, необходимо знать функциональные связи основных параметров обработки, и в первую очередь абсолютные значения и характер изменения скорости движения абразивных зерен в струе сжатого воздуха за пределами сопла, так как от этого зависят производительность и качество обработки деталей. Однако данные сведения отсутствуют в научно-технической литературе, что требует их установления для различных конструкций сопел и выбора на этой основе наиболее эффективного сопла.

Цель работы – определение путей повышения производительности при абразивной обработке деталей затопленными струями по критерию обеспечения наибольшей скорости движения абразивных зерен в момент их соударения с обрабатываемой поверхностью.

Изложение основного материала. В отличие от известных способов струйно-абразивной обработки, исследуемый метод характеризуется меньшим запасом кинетической энергии, сообщаемой абразивным частицам для воздействия на обрабатываемую поверхность, так как их ускорение начинается в момент инъекции в уже сформировавшуюся струю сжатого воздуха, истекающую из сопла. В связи с этим необходимо определить конструкцию сопла, обеспечивающую максимальную скорость движения абразивных частиц. Установление оптимальных

параметров сопла является одним из наиболее важных направлений исследований процесса абразивной обработки затопленными струями.

Общеизвестно, что чем легче зерна, тем быстрее они достигают высокой скорости движения. Однако в приграничном слое обрабатываемой детали происходит торможение зерен. Для более 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 движения 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. Экспериментальное определение скорости движения абразивных частиц в струе сжатого воздуха производилось с использованием специального устройства и различных сменных сопел, включая сверхзвуковое сопло Лавалья, сужающееся и расширяющееся конические сопла и цилиндрическое сопло (рис. 1). Результаты исследований зависимостей скорости абразивных частиц от длины канала сопла l_c графически представлены на рис. 2. Условия обработки: абразивные зерна 63С (зернистость абразива – 63П); давление сжатого воздуха перед соплом 0,5 МПа; критический (в наименьшем сечении) диаметр сопел 2 мм; частота вращения цилиндра – 770 мин⁻¹; внутренний диаметр цилиндров – 40, 60, 80 мм.

Как следует из приведенных графиков, с увеличением расстояния от среза сопла H скорость абразивных частиц первоначально увеличивается, а затем уменьшается, проходя точку максимума. При этом наибольшие экстремальные значения скорости абразивных частиц и расстояния от среза сопла достигаются при использовании сверхзвукового сопла Лавалья, обеспечивающего сверхзвуковую скорость истечения сжатого воздуха, что указывает на эффективность его применения.

Экспериментально также установлено, что длина канала сопла l_c неоднозначно влияет на скорость абразивных частиц. Так, при использовании сужающегося и расширяющегося конических сопел (рис. 2) с увеличением длины канала сопла l_c скорость абразивных частиц увеличивается, а при использовании цилиндрического сопла, наоборот, уменьшается. Нетрудно видеть, что для сверхзвукового сопла Лавалья имеет место экстремум (максимум) скорости абразивных частиц от длины сверхзвуковой части канала сопла l_c . Наибольшая скорость достигается при условии $l_c = 6$ мм.

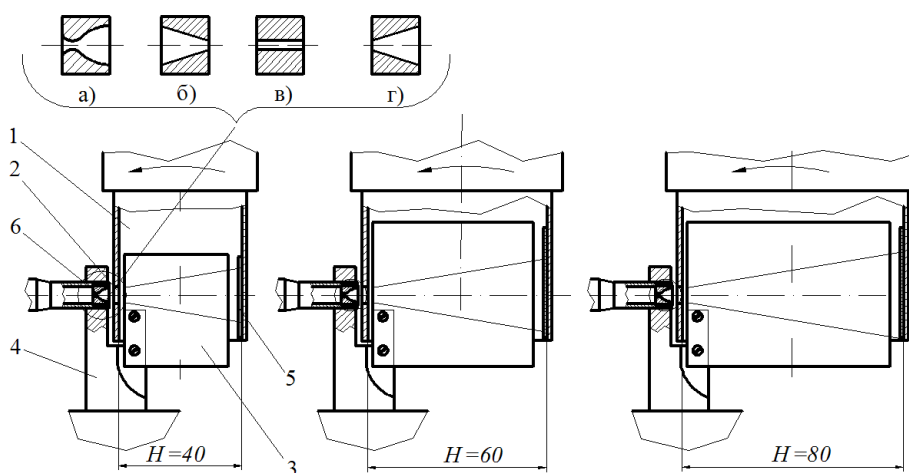


Рис. 1. Устройство для определения скорости движения абразивных зерен в струе сжатого воздуха со сменными соплами: а – сверхзвуковое сопло Лавалья; б – сужающееся коническое сопло; в – цилиндрическое сопло; г – расширяющееся коническое сопло.

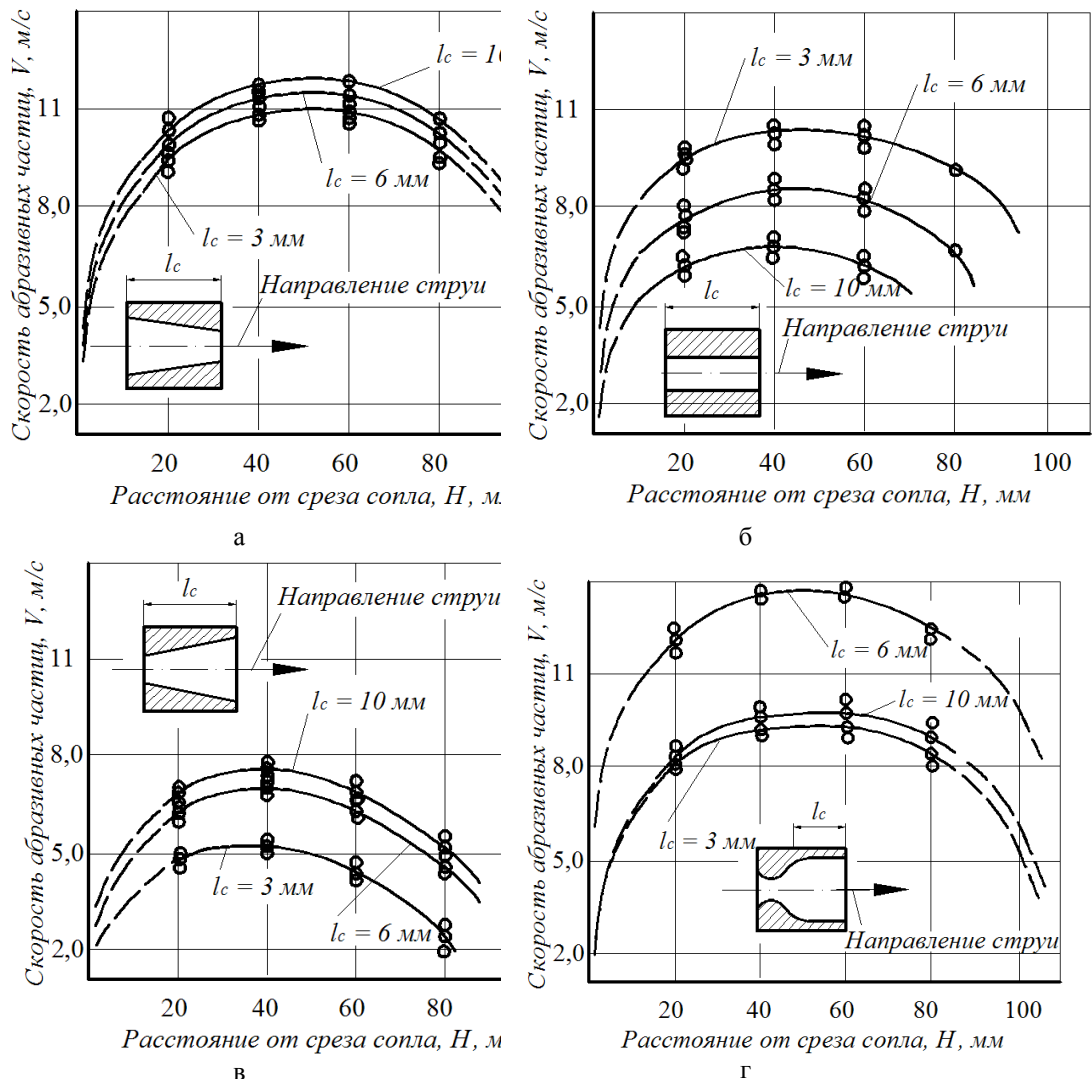


Рис. 2. Изменение скорости абразивных частиц, присоединяющихся к струе сжатого воздуха, по мере удаления от среза конического сужающегося сопла (а), цилиндрического сопла (б), конического расширяющегося сопла (в) и сверхзвукового сопла Лавая (г). Условия обработки: диаметр наименьшего сечения 2 мм; давление сжатого воздуха перед соплом 0,5 МПа; l_c – длина сверхзвуковой части канала сопла (г).

Таким образом, экспериментально доказана эффективность применения сверхзвукового сопла Лавая, обеспечивающего наибольшую скорость абразивных зерен. Необходимо отметить, что в условиях абразивной обработки деталей затопленными струями скорость абразивных зерен меньше, чем при обычной струйно-абразивной обработке. Это связано с присоединением абразивных зерен к струе после среза сопла, следовательно, их движение в районе среза сопла начинается с нулевой скорости, тогда как скорость абразивных зерен, прокачиваемых через сопло, в районе среза сопла близка к скорости сжатого воздуха.

Следовательно, поиск путей увеличения скорости абразивных зерен при абразивной обработке деталей затопленными струями является основным направлением интенсификации этого прогрессивного метода отделочной обработки. Очевидно, одним из эффективных путей является использование сжатого воздуха

высокого давления, поскольку такое увеличение не приведет к повышенному износу канала сопла, как это имеет место при традиционной струйно-абразивной обработке.

Сравнительный анализ графиков, приведенных на рис. 2, позволяет сделать вывод о достаточно высокой скорости, сообщаемой струей абразивным зернам, близкой к скорости, достигнутой абразивными зёрнами, присоединенными к сверхзвуковой струе. Это свойство сужающегося сопла объясняется тем, что, согласно работе [6], скорость истечения воздуха в этих условиях в критическом сечении достигает скорости звука в данной среде, т.е. в уплотненном воздухе, но не превышает скорость звука.

Скорость абразивных частиц, присоединяемых к струе, истекающей из цилиндрического сопла (рис. 2б), снижается с увеличением длины канала, что объясняется наличием аэродинамического сопротивления, тем большего, чем длиннее канал.

Наиболее низкая скорость абразивных частиц, присоединяемых к струе, истекающей из конического расширяющегося сопла (рис. 2в) объясняется тем, что на входе в сопло поток воздуха из-за острых кромок (значительного местного сопротивления) не набирает звуковую скорость, а после расширения еще больше теряет ее. При этом энергия струи расходуется на радиальную составляющую скорости. Чем короче канал, тем больше угол расширения струи и тем больше потеря осевой скорости.

Сверхзвуковое сопло Лавала по определению дает максимальную скорость потока струи воздуха. Причем, звуковая скорость характерна для критического (наиболее узкого) сечения сопла, после которого специальное профилирование обеспечивает увеличение скорости до сверхзвуковой, без увеличения расхода сжатого воздуха. Как и следовало ожидать, средняя скорость абразивных зерен, инжесктированных в струю, получила наибольшее значение (13,8 м/с), показанное на графике (рис. 2в).

Экспериментально также установлен характер изменения скорости абразивных зерен, присоединенных к струе за срезом сопла, в зависимости от зернистости абразива (рис. 3). В данном случае рассматриваются максимальные значения скорости абразивных зерен, т.е. соответствующие максимуму скорости в зависимости от расстояния от среза сопла H (рис. 2в). Как следует из рис. 3, скорость абразивных зерен уменьшается с увеличением зернистости абразива. Этот факт объясняется первым законом Ньютона – законом инерции: «... тело стремится сохранить состояние покоя ...» с учетом общеизвестного понятия «масса – мера инерции» более инертное тело в большей мере сохраняет состояние покоя, чем менее инертное. Однако, поскольку более массивное тело (абразивное зерно) имеет и большие габаритные размеры, т.е. большую «парусность», то на него действует большая сила со стороны струйного потока. В этом случае более массивное абразивное зерно в целом получит больший запас кинетической энергии, чем менее массивное зерно. Немаловажную роль в этой ситуации играет и время, в течение которого осуществляется передача кинетической энергии (скорости) от струйного потока к абразивному зерну. Так, при более длительном действии струйного потока на более массивное зерно (подача абразива через сопло) оно приобретет запас кинетической энергии, прямо пропорциональный отношению масс, т.е. в m_{max}/m_{min} раз больше. Здесь m_{max} и m_{min} – масса зерна большей и меньшей зернистости соответственно.

В отличие от известных методов струйно-абразивной обработки, когда из-за интенсивного износа используют наиболее простые по конструкции и потому относительно стойкие к абразивному износу цилиндрические сопла, абразивная

обработка затопленными струями позволяет использовать сопла любой конфигурации, в том числе и сопла Лавалья.

С учетом характера изменения скорости движения абразивного зерна в зависимости от зернистости абразива (рис. 3), важно определить запас кинетической энергии, сообщаемой струями сжатого воздуха абразивным зернам. Как известно, входящие в формулу для определения кинетической энергии масса и скорость абразивных зерен в условиях осуществления исследуемого процесса оказываются зависимыми величинами, т.к. нельзя при увеличении массы одновременно сохранить скорость и в прямо пропорциональной зависимости увеличивать кинетическую энергию абразивных зерен, а, следовательно, производительность обработки и глубину следов абразивных зерен. График зависимости запаса кинетической энергии движущегося абразивного зерна от его размеров (зернистости) с учетом изменения массы зерна от $2,0 \cdot 10^{-10}$ кг для зернистости №40 до $1,6 \cdot 10^{-9}$ кг для зернистости №80 показан на рис. 4.

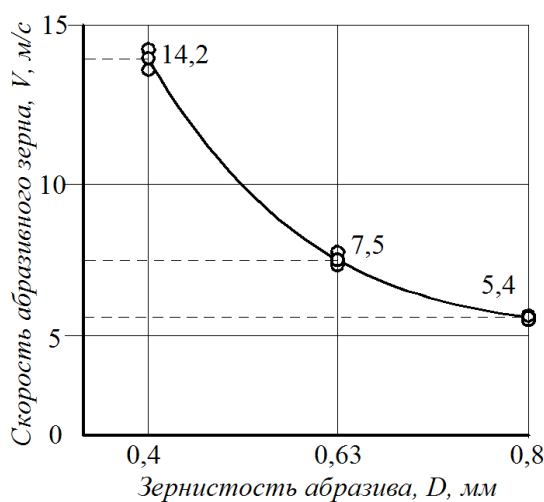


Рис. 3. Зависимость скорости абразивных зерен, присоединенных к струе за срезом сверхзвукового сопла Лавалья, от зернистости абразива. Условия обработки: шлифзерно – 63С (карбид кремния зеленый) диаметр критического сечения сопла – 2 мм; давление сжатого воздуха перед соплом – 0,5 МПа; расстояние от среза сопла – 40 мм

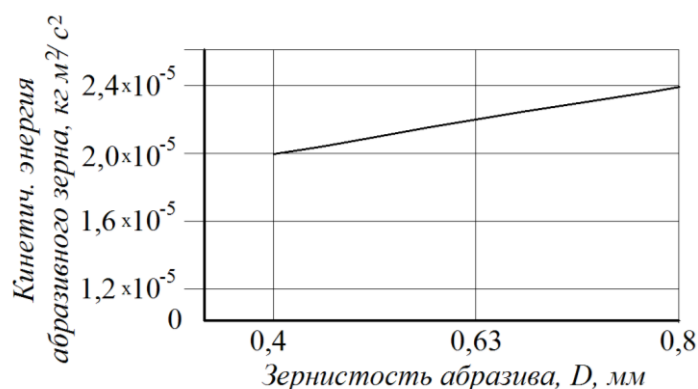


Рис. 4. Зависимость величины приобретаемой кинетической энергии абразивным зерном от его массы при изменении зернистости от №40 (0,4 мм) до №80 (0,8 мм)

Из графика видно, что изменение зернистости в 2 раза с 0,4 мм до 0,8 мм (т.е. на 100 %), а, следовательно, и массы зерна в 8 раз (т.е. на 800 %), кинетическая энергия абразивного зерна увеличилась лишь на 16 %. Настолько небольшой прирост кинетической энергии, в сравнении со значительным увеличением массы абразивного зерна, объясняется тем, что струя сжатого воздуха способна сообщить, в определенном диапазоне масс, некоторый запас кинетической энергии абразивному зерну практически независимо от его массы. Иными словами, более легкое зерно быстрее разгоняется и воздействует на обрабатываемую поверхность, выполняя определенную работу из-за небольшого по длине участка для разгона, а более тяжелое зерно разгоняется медленнее, но его масса с небольшим избытком компенсирует малую скорость. Следует все же констатировать тот факт, что большая масса абразивного зерна обеспечивает больший запас кинетической энергии, чем меньшая масса. Этот факт имеет большое значение в интенсификации процесса обработки.

ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований скорости движения абразивных зерен при использовании различных по конструктивному исполнению сопел, включая сверхзвуковое сопло Лавалья, сужающееся и расширяющееся конические сопла и цилиндрическое сопло. Доказано, что наибольшая скорость движения абразивных зерен и, соответственно, производительность обработки достигается при использовании сопла Лавалья, обеспечивающего сверхзвуковую скорость истечения сжатого воздуха. Доказано также, что одним из основных условий повышения скорости движения абразивных зерен является увеличение давления сжатого воздуха. Экспериментально установлено, что с увеличением зернистости абразива скорость абразивных зерен непрерывно уменьшается, а их кинетическая энергия, наоборот, увеличивается, вызывая увеличение интенсивности съема материала.

Перечень ссылок

1. *Проволоцкий А.Е.* Струйно-абразивная обработка деталей машин / *А.Е. Проволоцкий.* – К.: Техника, 1989. – 177 с.
2. *Исупов М. Г.* Разработка, исследование технологии струйно-абразивной финишной обработки: дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.08 Технология машиностроения / *Исупов Максим Георгиевич.* – М.: РГБ, 2007. – 432 с.
3. *Шманев В. А.* Струйно-абразивная обработка деталей ГТД / *В. А. Шманев, А. П. Шулепов, А. В. Мещеряков.* – М.: Машиностроение, 1995. – 143 с.
4. *Цыгановский А. Б.* Технологические возможности гидроабразивной обработки затопленными струями / *А. Б. Цыгановский* // Вибрации в технике и технологиях. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2010. – № 2(58). – С. 205–215.
5. *Андилахай А. А.* Абразивная обработка деталей затопленными струями / *А. А. Андилахай.* – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с.
6. *Абрамович Г. Н.* Прикладная газовая динамика / *Г. Н. Абрамович.* – М.: Наука, 1969. – 824 с.

*Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф.*

Статья поступила 07.05.2014г.