

УДК 621.9

Влияние параметров абразивного материала на статическое давление при потоковом методе обработки свободным абразивом

Бабаян Валерия Вагановна^(*)

valeria.bbn1106@gmail.com

Акулиничев Павел Дмитриевич

aka111996@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено формирование статического давления абразива при потоковой обработке для абразивных материалов различной природы и фракции. Представлено теоретическое выражение, описывающее давление в зависимости от параметров рабочей среды и режимов обработки. Определены основные физико-механические свойства рассматриваемых абразивов. Проведены экспериментальные исследования с целью верификации модели на ряде абразивных материалов, различающихся по составу и фракционным характеристикам. Установлено соответствие теоретических и практических данных для большинства рассмотренных материалов. Сделаны выводы о применимости модели для обоснования режимов обработки, а также обозначены предварительные ориентиры, способствующие более рациональному выбору абразивного материала.

Ключевые слова: отделочная обработка, свободный абразив, абразивный материал, давление абразивного материала, потоковая обработка

The influence of the parameters of the abrasive material on the static pressure during the flow method of processing with a free abrasive

Babayan Valeria Vaganovna^(*)

valeria.bbn1106@gmail.com

Akulinichev Pavel Dmitrievich

aka111996@mail.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The formation of static pressure during stream finishing was examined for abrasive materials of various origins and grain sizes. A theoretical expression was presented to describe the pressure as a function of the properties of the processing medium and the operating conditions. The main physical and mechanical characteristics of the abrasives under study were determined. Experimental investigations were carried out to verify the model using a range of abrasive materials differing in composition and granulometric parameters. A good agreement between theoretical predictions and experimental results was established for most of the materials tested. Conclusions were drawn regarding the applicability of the model for selecting processing parameters, and preliminary guidelines were outlined to support a more informed choice of abrasive materials.

Keywords: *finish machining, free abrasive, abrasive material, pressure of abrasive material, stream finishing*

Введение. Современное машиностроение предъявляет высокие требования к качеству обработки деталей. Обеспечение низкой шероховатости и высокой точности геометрии сложнопрофильных поверхностей становится критически важным для элементов, работающих в специфических условиях, например лопаток газотурбинных двигателей, где минимизация энергетических потерь и повышение эффективности тесно связаны с состоянием поверхности [1, 2].

Разработка новых технологических подходов для решения данных задач привела к распространению различных способов обработки незакрепленным абразивом. Перспективным методом является отделочная обработка потоком свободного абразива, обеспечивающая равномерный съем материала за счет совмещения вращательных движений заготовки и рабочего барабана. Данный метод демонстрирует высокую эффективность и технологическую гибкость при обработке деталей сложной конфигурации и позволяет достигать шероховатости до 0,04 мкм по Ra [3–5].

Однако одним из ключевых ограничений широкого внедрения рассматриваемого способа обработки остается отсутствие формализованных критериев выбора технологических режимов. В настоящее время они, как правило, назначаются эмпирически, что снижает воспроизводимость результатов, увеличивает время наладки и ограничивает применение технологии в условиях серийного производства.

В предыдущих исследованиях одним из приоритетных направлений было выделено изучение влияния режимов обработки на давление абразивной среды, воздействующей на поверхность заготовки при потоковом методе обработки [6]. Было получено выражение (1) для определения данного параметра, а также проведены экспериментальные исследования с использованием одного из наиболее распространенных абразивных материалов, применяемых при потоковом методе обработки.

$$P = P_{\text{ст}} + P_{\text{дин}} = k h \frac{\gamma \sqrt{g^2 + a^2}}{1 - \mu} + \frac{m_{\text{гр}} V_{\text{пот}}^2}{D_{\text{г}}^3}, \quad (1)$$

где $k = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$ — боковой коэффициент; φ — угол естественного откоса, град; γ — объемная плотность сыпучего материала, кг/м³; g — ускорение свободного падения м/с²; a — центростремительное ускорение абразива, м/с²; μ — коэффициент внутреннего трения; $m_{\text{гр}}$ — масса гранул абразивного материала, кг; $V_{\text{пот}}$ — скорость потока абразивного материала, м/мин; $D_{\text{г}}$ — диаметр гранулы абразивного материала, м.

Несмотря на высокий уровень корреляции экспериментальной и теоретической зависимости, была выявлена необходимость проведения ряда исследований с другими рабочими средами для того, чтобы определить область применения представленного выражения, а также оценить практическое из-

менение давления при использовании того или иного абразивного материала. Помимо формы и размера абразивных гранул, влияющих на динамическую составляющую давления, особый интерес представляет исследование свойств абразивного материала как сыпучей среды, определяющих статическую составляющую — менее изученный, но важный аспект процесса.

Таким образом, цель работы — исследование поведения статической составляющей давления различных абразивных материалов при потоковой обработке.

Материалы и методы. В рамках данного исследования рассмотрены следующие наполнители: керамические шарики Ball MC $\varnothing 4$; ореховый гранулят ОТЕС Н1/300; ореховый гранулят ОТЕС Н2/100; пластиковые конусы КХ12. Гранулят с различным фракционным составом позволил проследить различие характеристик для одного и того же материала. Для получения теоретических значений статического давления были предварительно определены основные параметры рабочей среды (удельный вес, внутреннее трение, угол естественного откоса).

Моделирование физико-механических процессов в сыпучих средах осложняется их стохастическим характером, поэтому любые аналитические зависимости требуют экспериментальной верификации. Поскольку эмпирически выделить статическую составляющую давления без учета динамики затруднительно, в настоящем исследовании измерялись полное давление рабочей среды и остаточное давление, отражающееся, согласно предыдущим данным, в статической составляющей.

Для получения практических данных использовалась опытная установка, основным элементом которой является вращающийся барабан, наполненный рабочей средой (рис. 1). В шпинделе вместо заготовки закреплялся специально разработанный прибор для определения давления абразивного материала.

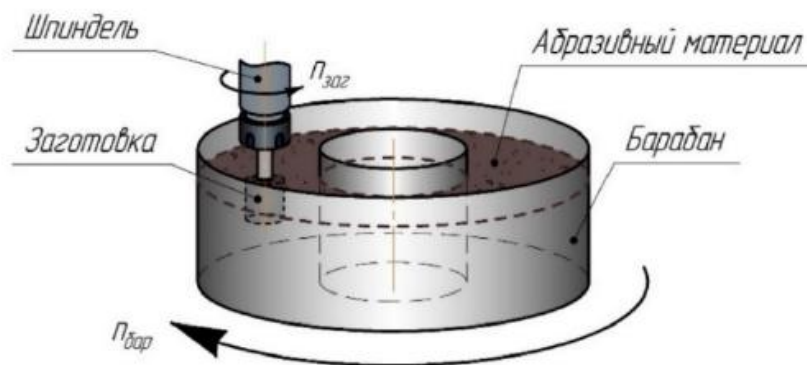


Рис. 1. Обобщенная схема обработки потоком абразивного материала

Результаты. В таблице представлены основные параметры рассматриваемых абразивных материалов. Теоретическая зависимость давления для рассматриваемого ряда абразивных материалов (рис. 2) приведена при глубине погружения ($h_{обр}$) принятой 50 мм.

Параметры абразивного материала

Абразивный материал	γ , кг/м ³	ϕ , град	D_r^* , мм
Керамические шарики Ball MC $\phi 4$	1487	28	4,00
Ореховый гранулят ОТЕС Н1/300	677	40	1,05
Ореховый гранулят ОТЕС Н2/100	700	38	2,05
Пластиковые конусы КХ12	820	38	7,42

* Указан средний размер гранул.

Экспериментальные значения остаточного давления абразивного материала при различной глубине погружения представлены на рис. 3.

На рис. 4 представлены экспериментальные и теоретические зависимости полного давления от скорости потока для рассматриваемого ряда абразивных материалов при глубине погружения ($h_{обр}$) принятой 50 мм.

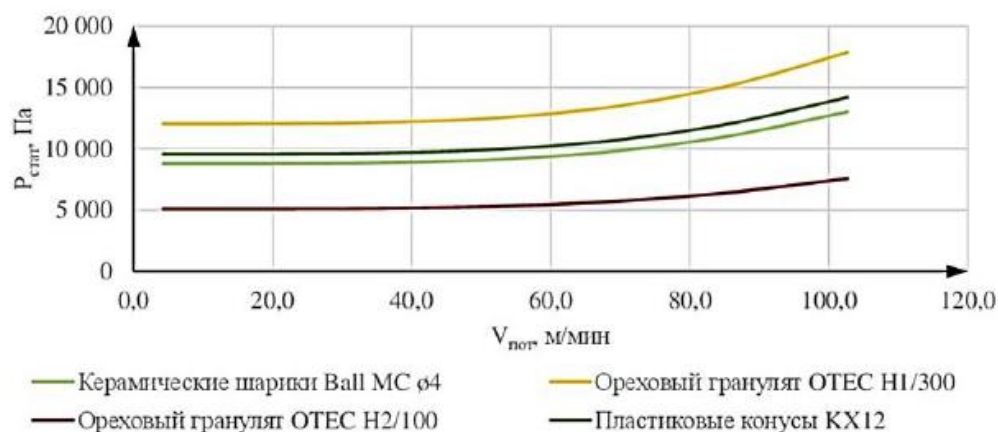


Рис. 2. Теоретическая зависимость статического давления в различных абразивных материалах

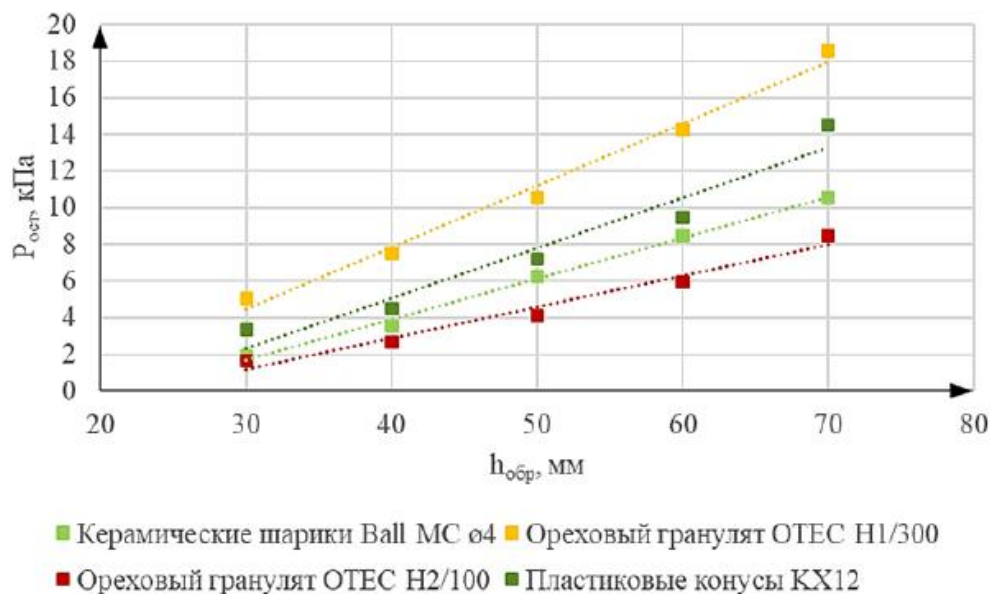


Рис. 3. Остаточное давление в различных абразивных материалах

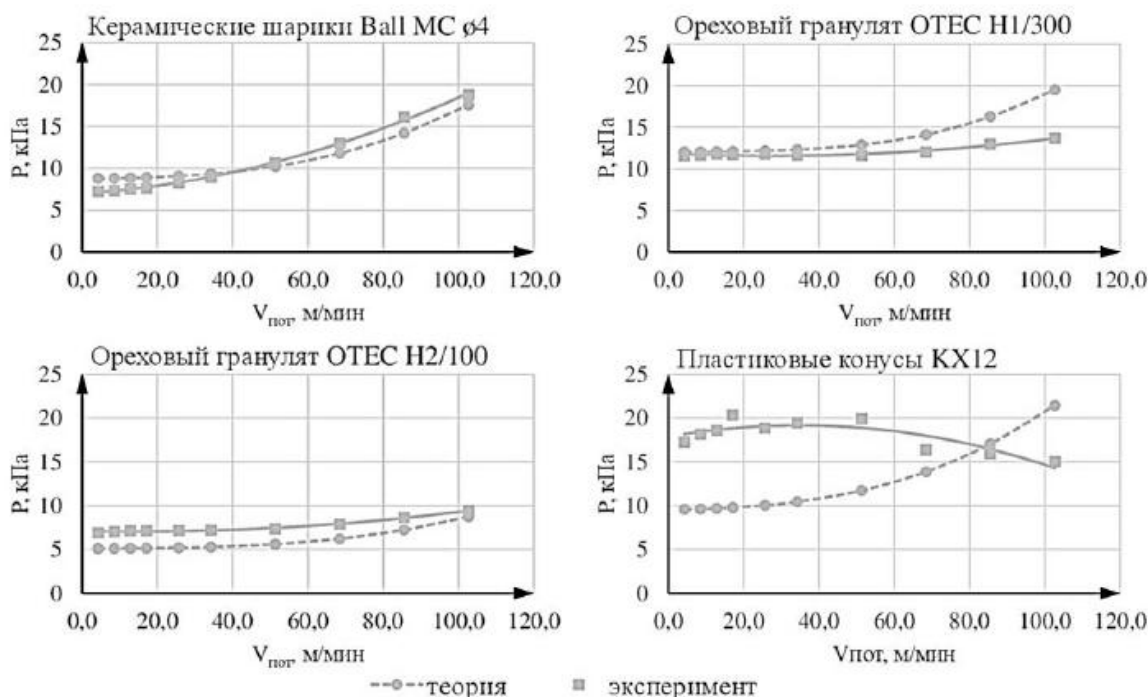


Рис. 4. Полное давление рабочей среды на заготовку при использовании различных абразивных материалов

Обсуждение полученных результатов. Полученные результаты показали несоответствие теоретических и практических значений статического давления при использовании пластиковых конусов в качестве абразивного материала, что прослеживается по существенной разнице $P_{\text{стат}}$ (рис. 2) и измеренного $P_{\text{ост}}$ (рис. 3), составившей порядка 8 кПа (на глубине 50 мм). Это позволяет сделать вывод, что выражение (1) не применимо для подобного абразива. В большей степени это связано с иным характером взаимодействия, поскольку размеры гранул в данном случае соизмеримы с размером образца и не могут рассматриваться как система сыпучей среды. Об этом также свидетельствует различие теоретического и экспериментального графика для полного давления (рис. 4). Для остальных же абразивных материалов подобных расхождений не установлено. Более того, наблюдается высокий уровень корреляции расчетных и практических зависимостей.

Полученные данные для орехового гранулята различного фракционного состава указывают на повышение статического давления при уменьшении размера абразивных частиц. Это связано с большей фактической площадью контакта и более эффективным уплотнением сыпучей среды при вращении барабана.

Сопоставление величин статического давления показывает, что характеристики абразивного материала следует анализировать в совокупности, а не изолированно. Например, статическое давление, создаваемое керамическими шариками с удельной плотностью в два раза большей, чем у ореха, оказывается ниже, чем у гранулята H1/300, но выше, чем у гранулята H2/100.

Стоит также отметить влияние размера частиц в среде относительно образца на вклад статической составляющей в полное давление. Для орехового

гранулята, имеющего значительно меньшие размеры частиц, статическое давление будет определяющим, тогда как вклад динамической составляющей незначителен даже при больших значениях скорости потока.

Заключение. Предложенное выражение (1) корректно описывает статическую составляющую давления для абразивных материалов, типоразмер которых существенно меньше обрабатываемой заготовки (керамические шарики Ø 4 мм; ореховый гранулят Н1/300 и Н2/100). Коэффициенты корреляции между расчетными и измеренными значениями полного давления превысили 0,88, что подтверждает работоспособность модели в области практических режимов. Также получено подтверждение значимости выделенных параметров и обоснован принятый ранее подход к описанию процесса с точки зрения сыпучих сред.

На этапе проектирования процесса обработки влияние скорости потока абразивного материала на давление можно свести к минимуму (при значениях скорости менее 100 м/мин), применяя абразив с размером гранул, существенно меньшим по сравнению с размерами обрабатываемой заготовки. В этом случае давление будет преимущественно определяться глубиной погружения в рабочую среду.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение базы абразивных материалов, в том числе с учетом изменения их физико-механических свойств при использовании технологических жидкостей. Кроме того, стоит рассмотреть необходимость адаптации модели к случаям, когда размер абразивных частиц соизмерим с геометрией обрабатываемой поверхности.

Список источников

- [1] Васильев А.С. Направленное формирование эксплуатационных свойств деталей в технологических средах. *Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение*, 2017, № 1, с. 33–40.
- [2] Хайрулин В.Т., Самохвалов Н.Ю., Тихонов А.С., Сендюров С.И. Оценка влияния шероховатости поверхности лопаток на параметры турбины высокого давления. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2014, № 2 (37), с. 99–111.
- [3] Бабаев А.С., Чарторийский В.П. Технологии инновационной буксирной и потоковой финишной абразивной обработки изделий машиностроения, медицины и режущих инструментов. *Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий. VII Всерос. науч.-техн. конф.: матер.* Уфа, Уфимский государственный авиационный технический университет, 2017, с. 96–102.
- [4] Akulinichev P.D., Goncharov A.A., Al'bov M.A., Zenin I.O. Design Method for Finishing by Free Abrasive. *Russian Engineering Research*, 2024, vol. 44, no. 7, pp. 931–934. <https://doi.org/10.3103/s1068798x24701612>
- [5] Дегтярев В.В., Колесов С.Н. Исследование процессов, схем и режимов обработки потокового галтования при изготовлении деталей РВР, РВ редукторов и РВ приводов. *Неделя науки СПбПУ: матер.* Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та, 2017, ч. 2, с. 325–327.
- [6] Бабаян В.В., Акулиничев П.Д., Гончаров А.А., Гнатенко П.Э. Экспериментальное исследование остаточного давления в абразивном материале при потоковой галтовке. *Технология машиностроения*, 2025, № 4, с. 26–30.