

УДК 621.923.9

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-6-13

Выбор вида и величины зерна наполнителя при обработке абразивным потоком прямоугольных заготовок из цветных сплавов

П. А. Иванов, аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

В. А. Левко, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

Обработка абразивным потоком является одной из перспективных технологий финишной обработки прямоугольных каналов, для которых характерно постоянное повышение точности и снижение шероховатости поверхности. По этой причине проведено моделирование контактного взаимодействия зерна в углах поперечного сечения прямоугольной заготовки при предполагаемой обработке абразивным потоком, зафиксированы ключевые особенности выбора величины зерна наполнителя. В предложенной сферической модели зерна режущая кромка представлена дугой окружности, вписываемой в угол поперечного сечения заготовки. Подтверждено, что при размере зерна, превышающем значение внутреннего радиуса скругления угла заготовки, возникает необработанный участок, площадь которого просчитана с помощью САД-системы на прямом, тупом и остром углах.

Проанализированы физические свойства, форма режущих кромок и применимость наполнителей: электрокорунда, карбида кремния и синтетического алмаза. Форма алмазного зерна по сравнению с представленными наполнителями показывает более округлую форму граней кристалла, которая обуславливает большую микротвердость и абразивную способность. Выявленные особенности подтверждают исключение возможного явления шаржирования в процессе постобработки. Рекомендуется использовать зерна абразива определенной зернистости для равномерной предварительной обработки грубой поверхности с последующей полировкой мазеообразной алмазной пастой каналов малого поперечного прямоугольного сечения.

Использование в качестве наполнителя мазеообразной пасты, содержащей алмазные зерна, позволяет уменьшить вязкость среды, а дисперсность алмазных зерен – обработку углов прямоугольного сечения. Для финишной обработки прямоугольных заготовок из цветных сплавов предложена обработка абразивным потоком рабочей средой средней вязкости с использованием в качестве основы синтетического каучука СКТ, а наполнителя – мазеообразной пасты, содержащей алмазные зерна. Применение рабочих сред с алмазными пастами позволяет обрабатывать абразивным потоком внутренние каналы заготовок из различных цветных сплавов.

Для представленных в данной статье минимальных прямоугольных сечений трубчатых заготовок предлагается использование рабочей среды следующего весового состава: каучук СКТ – 40 %, алмазная паста АСН 60/40 ВОМ Г – 60 %. Для проведения дальнейших исследований предложен ряд общих рекомендаций.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, прямоугольная заготовка, абразивное зерно, наполнитель, алмазная паста.

Введение

В машиностроении одной из проблем является обеспечение равномерной шероховатости на внутренних поверхностях труб прямоугольного сечения с постоянным по форме и площади в поперечном сечении. Величина шероховатости внутреннего канала трубных заготовок рекомендована не более $Ra = 0,4 \dots 0,2$ мкм, значения отклонения

толщины стенки трубы $\leq 0,2$ мм и от прямого угла поперечного сечения $\pm 1^\circ$ [1].

Использование традиционных методов финишной обработки некруглых заготовок невозможно из-за затрудненного доступа режущей части инструмента к обрабатываемым поверхностям, вызванного малыми размерами сечения заготовки, в том числе имеющих участки с изгибами по внутреннему и внешнему радиусу.

Это ограничение обосновывает необходимость применения специальных методов отделки, в которых в качестве инструмента применяется поток жидкостных и уплотненных рабочих сред, несущих элементы в виде шариков, абразивных или алмазных частиц, которые при перемещении вдоль обрабатываемой поверхности вступают в контакт с ее неровностями и в конечном итоге копируют форму обрабатываемого канала [2].

После изучения вопроса применимости специальных технологий постобработки с точки зрения обеспечения равномерности шероховатости тонкостенных заготовок некруглого сечения, имеющих изогнутые участки, было установлено, что поток применяемой рабочей среды при течении должен полностью копировать форму поперечного сечения по всей длине обрабатываемого канала (Иванов П. А., Левко В. А. (2021) Перспективы обработки абразивным потоком внутренней поверхности изогнутых трубных заготовок прямоугольного сечения).

Кроме того, поток должен обладать вязкоупругими свойствами, которые обеспечивали бы оптимальное сочетание скорости потока и его давления на обрабатываемую поверхность [3]. Данными свойствами обладает такой нетрадиционный метод финишной обработки, как обработка абразивным потоком (Abrasive Flow Machining (AFM)). Рабочая среда для реализации процесса AFM представляет собой смесь полимерной основы – синтетического каучука (СКТ) с наполнителем: электрокорунд, карбид кремния и синтетический алмаз (Левко В. А. (2015) Научные основы абразивно-экструзионной обработки деталей).

При обзоре результатов экспериментальных и теоретических исследований зарубежных [4, 5] и российских исследователей (Levko V.A., Litovka O.V., Savin D.I., Terjaev N.S. DOI: 10.1088/1757-899X/1155/1/012029) в области AFM сложнопрофильных каналов было выявлено отсутствие данных по влиянию выбора вида наполнителя и величины зернистости на равномерность обработки в углах некруглого канала заготовок из цветных сплавов.

Целью исследования является теоретический подбор допустимого размера зерна с последующим выбором вида наполнителя рабочей среды, при котором можно будет обеспечить равномерность обработки абразивным потоком всей площади минимального прямоугольного поперечного сечения заготовки путем моделирования контакта зерна в углах канала и анали-

зом свойств существующих видов рабочих элементов среды.

Выбор величины наполнителя

Исследования обработкой абразивным потоком внутренних поверхностей труб показали высокую эффективность применения данного метода в качестве финишной обработки [6]. Опытным путем подтверждено, что размер зерна оказывают важную роль на силы резания, возникающие при контакте зерна с обрабатываемой поверхностью, и как следствие – на абразивную способность рабочей среды в процессе AFM [7, 8].

Для последующих исследований авторами решено выбрать размеры стандартизованных труб ($a \times b \times c$) с углом по поперечному сечению $90 \pm 1^\circ$ и внутренним r , наружным R радиусом закругления. Для заготовок из медных и латунных сплавов приняты размеры поперечного сечения $2,4 \times 1,2 \times 0,8$ мм, радиусы закругления r и $R = 0,1$ мм, из алюминия – $11 \times 5,5 \times 1,4$ мм, r и $R = 0,4$ мм.

Известно, что в потоке рабочей среды при AFM происходит структурирование частиц наполнителя. Под действием сдвигающего давления частицы формируют цепочки, перемещающиеся в линиях тока вязкоупругой среды [9]. Предложено, что цепочки состоят из последовательно соединенных сегментов, каждый из которых деформируется независимо от остальных, а условие неразрывности цепочки обеспечивается соединением сегментов вязкоупругой среды в шариках, моделирующих рабочие частицы, окруженные сольватной оболочкой. Сольватная оболочка представляет собой часть среды, физические свойства которой изменены вследствие возникновения поверхностных сил на границе абразивное зерно – вязкоупругая среда [10, 11]. Данное предположение подтверждено при исследовании возникновения силовых цепочек в процессе AFM [12]. На самом деле зерно представляет собой многогранный инструмент, микровыступы которого при обработке вступают в контактные взаимодействия с обрабатываемой поверхностью, но их основная масса имеет сферическую форму, в особенности алмаз [13]. Таким образом, для оценки влияния величины зерна на обработку в углах поперечного сечения заготовки была принята упрощенная сферическая модель зерна (рис. 1).

Для последующего теоретического анализа контактных взаимодействий зерен наполнителя различной величины в углах прямоугольного

канала предложена принципиальная схема (рис. 2). В предложенной авторами сферической модели зерна режущая кромка представлена дугой окружности, аппроксимированной ломаными отрезками между микровыступами зерна. Моделирование контакта режущей кромкой зерна по схеме произведено с применением САД-системы при соотношении размеров зерна наполнителя и поперечного сечения заготовки в масштабе 1:1 и отклонения обработанной поверхности от прямого угла $\pm 1^\circ$.

Из схемы наглядно видно, что по касательной дуге зерна к внутреннему радиусу в углах сечения зерно радиусом $\leq r$ полностью вписывается в каждый угол по поперечному сечению заготовки. При такой величине зерна наполнителя режущая кромка будет контактировать со всей поверхностью внутреннего радиуса скругления, то есть обработка в углах будет обеспечена по всему сечению.

Если размер зерна будет превышать значение r , то в каждом прямоугольном угле заготовки

возникнет необработанный участок. Для расчета значения площади S необработанного участка поверхности был использован модуль измерения данной площади на прямом, тупом, остром угле, а также суммы площадей четырех таких участков для сечений a и b (рис. 2). Их значения приведены в таблице 1.

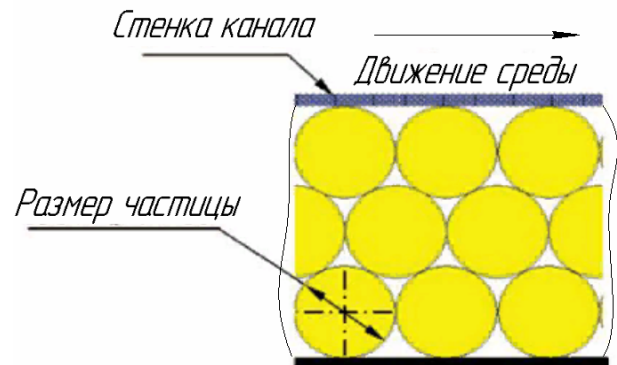


Рис. 1. Моделирование силовой цепочки

Fig. 1. Power chain simulation

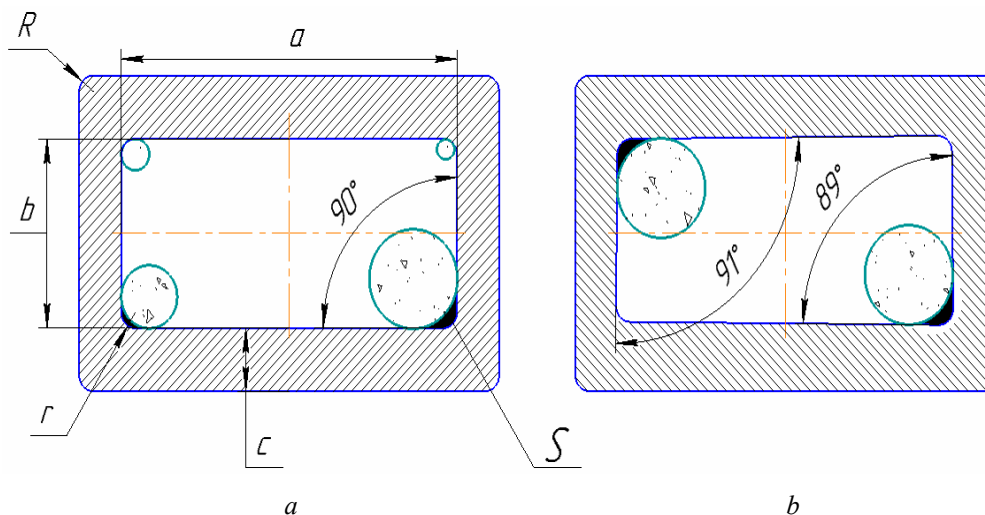


Рис. 2. Схема взаимодействия зерна различных размеров при обработке абразивным потоком в углах внутренней поверхности по минимальному поперечному сечению: a – поперечное сечение канала с углом 90° ; b – поперечное сечение канала с углом 91° (тупой угол) и 89° (острый)

Fig. 2. Scheme of the interaction of grains of different sizes during processing with an abrasive flow in the corners of the inner surface along the minimum cross section: a - channel cross section with angle 90° ; b - channel cross section with angle 91° (obtuse angle) and 89° (sharp)

Таблица 1. Численные значения площади необработанной поверхности в углах заготовки

Table 1. Numerical values of the area raw surface in the corners of the workpiece

Размер зерна, мкм	$S(90^\circ)$, мкм ²	$\sum S$, мкм ²	$S(91^\circ)$, мкм ²	$\sum S$, мкм ²	$S(89^\circ)$, мкм ²	$\sum S$, мкм ²
Сечение: $2,4 \times 1,2 \times 0,8$ мм						
250	1,1	4,4	1	4	1,2	4,8
400	6	24	5	20	7	28
600	17	68	16	64	15	60
800	31	136	30	120	29	116
1000	50	250	49	196	51	204

Окончание табл. 1

Table 1 (continued)

Размер зерна, мкм	$S(90^\circ)$, мкм ²	$\sum S$, мкм ²	$S(91^\circ)$, мкм ²	$\sum S$, мкм ²	$S(89^\circ)$, мкм ²	$\sum S$, мкм ²
Сечение: 11 × 5,5 × 1,4 мм						
1000	19	76	18	72	20	80
1500	80	320	79	316	81	324
2000	170	680	169	676	171	684
2500	300	1200	299	1196	301	1204
3000	420	1680	419	1676	421	1684

Таким образом, для проанализированного сечения 2,4 × 1,2 × 0,8 мм использование зерна величиной, превышающей значение $r = 0,1$ мм, приведет к образованию в углах поперечного сечения четырех необработанных участков, суммарная площадь $\sum S$ которых в зависимости от размера зерна будет составлять от 1 до 49 мкм².

При АФМ сечения 11 × 5,5 × 1,4 мм с величиной зерна более $r = 0,4$ мм суммарная площадь необработанных участков в углах поперечного сечения $\sum S$ составит от 76 мкм² до 1,7 мм². Это приведет к образованию полосы необработанной поверхности по всей длине обрабатываемого канала.

В соответствии с полученными данными можно сделать вывод, что равномерность обработки по всей площади поперечного сечения прямоугольной заготовки, в том числе и в углах, будет достигнута при выборе величины зерна наполнителя, не превышающего значение удвоенного радиуса внутреннего закругления прямого угла канала.

Влияние вида наполнителя на финишную обработку внутренних полостей прямоугольной заготовки

В настоящее время при АФМ в качестве наполнителя рабочей среды применяются зерна карбида кремния, электрокорунда и синтетических алмазов. Сравнительная характеристика свойств таких наполнителей приведена в таблице 2 [14].

Кристаллы электрокорунда имеют форму неправильных многогранников (ромбоэдрическая форма) с заостренными гранями, что обуславливает склонность данного абразива к скалыванию этих граней в ходе контактных взаимодействий при обработке. В машиностроении электрокорунд применяется для обработки заготовок из различных видов сталей, латуни и бронзы, а также при обработке свободным абразивом (пескоструйная, гидроабразивная обработка) [15].

Таблица 2. Сравнительная характеристика свойств наполнителей

Table 2. Comparative characteristics of the properties of fillers

Свойства	Электрокорунд	Карбид кремния	Алмаз синтетический
Плотность, г/см ³	3,9	3,2	3,5
Микротвердость, ГПа	20	35	90
Твердость по Моосу, ед.	9	9,5	10
Абразивная способность, г	0,04...0,06	0,09	0,5

Кристаллы карбида кремния имеют больше прямолинейных режущих кромок по сравнению с зёрнами электрокорунда. Микровыступы зерна карбида кремния имеют больший радиус и их стойкость к скалыванию выше, чем у электрокорунда. Применяются зерна карбида кремния в операциях доводки и шлифования твердых материалов [16, 17].

Алмазные микропорошки из синтетических алмазов выпускаются мажеобразными пастами в основном двух типов АСМ и АСН, которые предназначены для доводки и полирования цветных металлов и сплавов. Кристаллы алмаза имеют форму октаэдров, небольшое количество зерен имеют пластинчатую и игольчатую форму, а основная масса зерен имеет сферическую форму с множеством граней. Углы при вершинах алмазных зерен меньше, чем при вершинах абразивных, что определяет возможность снятия алмазной пастой в отличие от абразива тонкой стружки и получения более высокого класса шероховатости поверхности.

При определении оптимального выбора режимов АФМ при чистовой обработке А1/15 вес.% SiC-ММС в качестве наполнителя рабочей среды были использованы зерна карбида кремния различной величины. В ходе проведенного исследования установлено, что при неправильном выборе режимов обработки наблюдается нежелательный эффект в виде появления

глубоких царапин с выдавливанием материала на кромку царапины. Большое влияние на процесс обработки оказывает величина абразивного зерна и процент содержания абразива в рабочей среде. Вязкость рабочей среды также оказывает существенное влияние на производительность обработки и величину шероховатости обработанной поверхности.

В ходе экспериментальных исследований при отделке заготовок из материала Al/SiC-ММС в процессе АФМ установлено, что оптимальные результаты обработки достигаются при обработке зернами карбида кремния зернистостью 200 мкм, давлении экструзии 4,5 МПа и 50%-й концентрации абразива в рабочей среде [18].

При обработке алюминиевых сплавов для удаления дефектного слоя рекомендовано использовать абразив с углами при вершине микровыступов менее 90° , что характерно, например, для электрокорунда, а для уменьшения шероховатости поверхности – с углами $90...120^\circ$ (например, карбид кремния) при силе прижатия единичного абразивного зерна в диапазоне $0,02...0,4$ Н, что позволит реализовать пластическое деформирование [19].

При исследовании процесса абразивно-экструзионной обработки малых отверстий в заготовках из алюминия рекомендовано в качестве наполнителя и пластификатора использовать мазеобразные алмазные пасты типа Е или Г. Весовое содержание в среде алмазных зерен $24...28\%$ и использование в качестве основы синтетического каучука СКТ обеспечивает такое сочетание вязких и упругих свойств среды, при котором сохраняется возможность ее сдвигового течения в отверстии с малым поперечным сечением и максимальное по величине напряженно-деформированное состояние, позволяющее добиваться максимальной производительности (Левко В. А., Левко А. А. (2011) Исследование процесса абразивно-экструзионной обработки малых отверстий).

Анализ публикаций подтверждает применимость всех трех видов наполнителей в технологии АФМ. Однако предпочтительно применение синтетических алмазов по сравнению с абразивами для постобработки каналов некруглой формы из цветных сплавов.

Это связано в первую очередь с округлой формой граней кристаллов синтетического алмаза (рис. 3). Такая форма обуславливает его большую микротвердость, абразивную способность и определяет высокую стойкость граней к скалыванию в ходе контактных взаимодействий, тем самым практически исключая вероят-

ность шаржирования сколотыми частичками обрабатываемой поверхности в отличие от абразива.

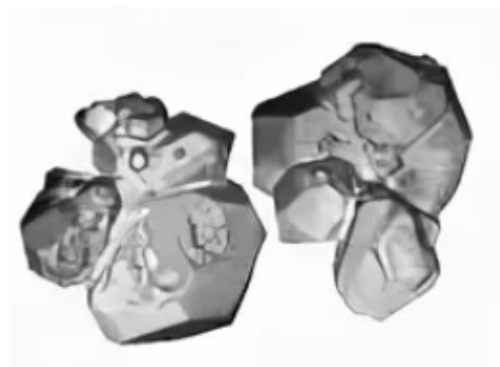


Рис. 3. Форма зерна синтетического алмаза

Fig. 3. Synthetic diamond grain shape

Конструкция прямоугольных труб характеризуется большим отношением площади всей внутренней поверхности канала заготовки к площади ее поперечного сечения. Для подобных заготовок применение рабочих сред высокой вязкости при АФМ затруднено. Использование в качестве наполнителя мазеобразной пасты, содержащей алмазные зерна, позволяет уменьшить вязкость среды до средней вязкости, а дисперсность алмазных зерен – обработку углов прямоугольного сечения [20].

Процентное содержание алмазной пасты в рабочей среде определяется соотношением площади всей внутренней поверхности канала заготовки к площади ее поперечного сечения. Чем больше это отношение, тем выше концентрация пасты в рабочей среде.

Применение рабочих сред с алмазными пастами для АФМ позволит проводить обработку в один этап. Такие среды могут быть использованы для финишной обработки заготовок из любых цветных сплавов. Для рассмотренных в статье сечений трубных заготовок с прямоугольным поперечным сечением ($2,4 \times 1,2 \times 0,8$ мм, r и $R = 0,1$ мм; $11 \times 5,5 \times 14,5 \times 1,4$ мм, r и $R = 0,4$ мм), предлагается использование рабочей среды следующего весового состава: каучук СКТ – 40% , алмазная паста АСН 60/40 ВОМ Г – 60% .

Выводы

Равномерность обработки всей площади поперечного сечения прямоугольной трубной заготовки, в том числе и в углах с обеспечением допуска $90 \pm 1^\circ$, будет достигнута при использовании наполнителя, величина зерна которого не превышает значения удвоенного радиуса внутреннего закругления поперечного сечения.

Абразивные зерна карбида кремния и электрокорунда имеют свойства скалывания их граней в ходе контактных взаимодействий с обрабатываемой поверхностью, что не исключает теоретической возможности шаржирования поверхности заготовок из цветных сплавов сколотыми частицами. Следовательно, следует учитывать исходное состояние поверхности перед финишной обработкой. Ключевым моментом является возможное застраивание абразивных частиц в поверхностном слое, не позволяющее равномерно нанести токопроводящее покрытие на обработанную поверхность детали. Поэтому в зависимости от качественного состояния поверхности канала рекомендуется проводить отделку внутренних поверхностей деталей с грубой шероховатостью в два этапа: предварительная обработка зернами карбида кремния и электрокорунда (если размер зерна вписывается в угол заготовки), а после окончательная полировка алмазной пастой.

Применение алмазных зерен, имеющих высокую стойкость граней к скалыванию в ходе контактных взаимодействий, практически исключает вероятность шаржирования сколотыми частичками обрабатываемой поверхности.

Использование в качестве наполнителя маэобразной алмазной пасты позволит за счет изменения ее концентрации регулировать вязкость рабочей среды в зависимости от геометрических характеристик обрабатываемой заготовки и проводить AFM заготовок из цветных сплавов.

Библиографические ссылки

1. Косьяненко С. В., Патраев Е. В., Петрусев В. В., Трифанов И. В. Анализ технологичности деталей гибких волноводных секций космического аппарата // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. №12(741). С. 53-61.
2. Zhakupova A.Y., Ondrisov D.B., Kanafin M.Z., Aukatova N.K., Kuranber B.N. Solving the problem of abrasive machining in the production of rocket and space technology details. *Vestnik Evraziiskogo natsional'nogo universiteta imeni L.N. Gumileva. Seriya Fizika. Astrofiziya*, 2020, no. 2, pp. 42-49.
3. Зверинцева Л. В., Зверинцев В. В., Кочкина Г. В. Исследование рабочей среды при абразивно-экструзионной обработки. *Технология машиностроения*. 2021. № 5. С. 42-48.
4. Petare A.C., Jain N.K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, Iss. 1-4, pp. 741-782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>.
5. Youzhi Fu, Hang Gao, Qiusheng Yan, Xuanpling Wang, Xu Wang. An efficient approach to improving the finishing properties of abrasive flow machining with the analyses of initial surface texture of workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05173-5>.
6. Palwinder Singh, Lakhvir Singh, Sehijpal Singh. Experimental Comparison of Abrasive Flow Machining and Magnetic Abrasive Flow Machining for Aluminium Tubes. *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)*, 2018, vol. 04, Iss. 03. DOI: 10.18231/2454-9150.2018.0410.
7. Butola R., Jain R., Bhangadia P., Bandhu A., Walia R.S., Murtaza Q. Optimization to the parameters of abrasive flow machining by Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 05, Iss. 02. DOI: 10.1016/J.MATPR.2017.12.044.
8. Новосельский Н. К., Васильева Е. К., Сысоев А. С. Микрорезание при абразивно-экструзионной обработке // *The Scientific Heritage*. 2020. № 44-1 (44). С. 45-48.
9. Wang Tingting, Chen De, Zhang Weihua, An Luling. Study on key parameters of a new abrasive flow machining (AFM) process for surface finishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 101, Iss. 2, pp. 39-54. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2914-9>.
10. Pshenko E.B., Shestakov I.Ya., Shestakov V.I. The research of thermophysical properties of the working environment for abrasive-extrusion processing. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2019, vol. 20, no. 2, pp. 277-283.
11. Yinguang Li, Guizhen Song, Bowen Hon, Jianming Cheng. Study on the correlation between grain size and processing limit in abrasive flow machining. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Conf. Ser. 1884 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1884/1/012002.
12. Xiu Tian-Xun, Wang Wei, Liu Kun, Wang Zhi-Yong, Wei Dao-Zhu. Characteristics of force chains in frictional interface during abrasive flow machining based on discrete element method. *Advances in Manufacturing*, 2018, 6, pp. 355-375. <https://doi.org/10.1007/s40436-018-0236-7>.
13. Li Yinguang, Song Guizhen, Hon Bowei, Cheng Jianming. Study on the correlation between grain size and processing limit in abrasive flow machining. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. doi:10.1088/1742-6596/1884/1/012002
14. Рагулин В. Д., Бокова Л. Г. Особенности обработки деталей со сложными геометрическими поверхностями с использованием несвязанных абразивов // *Современные материалы, техника и технологии*. 2020. № 1 (28). С. 50-54.
15. Калимуллина З. А. Абразивные материалы, классификация, виды их характеристики // *Аллея науки*. 2018. № 11 (27). С. 42-45.
16. Применение роботизированной финишной обработки в свободном абразиве для алюминиевых цилиндров / А. С. Бабаев, Н. В. Лаптев, Е. В. Столов, А. Р. Семёнов // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2018. № 1-2. С. 31-36.
17. Скрябин В. А. Финишная абразивная обработка тонкостенных пластин // *Вестник Брянского*

государственного технического университета. 2021. № 9 (106). С. 15–22.

18. Swarn Singh, Harish Kumar, Santosh Kumar, Saurabh Chaitanya. A systematic review on recent advancements in Abrasive Flow Machining (AFM). *Materials Today: Proceedings*, 2021. DOI 10.1016/j.matpr.2021.12.273

19. Chirov A. N., Sapegin A. M., Zhumabaev E. N., Sysoeva L. P., Shelikhova S. V. Abrasive extrusion processing of aluminum alloys. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2018, no. 8, pp. 30–33.

20. Карпаченко К. А. Шлифование как разновидность абразивной обработки, виды, область применения. Типы шлифовального инструмента и материалы // Инновационные технологии в машиностроении, образовании и экономике. 2020. Т. 28, № 3 (17). С. 86–91.

References

1. Kosyanenko S.V., Patraev E.V., Petrushev V.V., Trifanov I.V. [Analysis of fabricability of flexible waveguide parts for satellite applications]. *News of higher educational institutions. Engineering*, 2021. no. 12, pp. 53–61 (in Russ.).

2. Zhakupova A.Y., Ondrisov D.B., Kanafin M.Z., Aukatova N.K., Kuranber B.N. Solving the problem of abrasive machining in the production of rocket and space technology details. *Vestnik Evraziiskogo natsional'nogo universiteta imeni L.N. Gumileva. Seriya Fizika. Astronomiya*, 2020, no. 2, pp. 42–49.

3. Zverintseva L.V., Zverintsev V.V., Kochkina G.V. [Investigation the working environment during abrasive-extrusion processing]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2021, no. 5, pp. 42–48 (in Russ.).

4. Petare A.C., Jain N.K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, Iss. 1–4, pp. 741–782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>.

5. Youzhi Fu, Hang Gao, Qiusheng Yan, Xuanpling Wang, Xu Wang. An efficient approach to improving the finishing properties of abrasive flow machining with the analyses of initial surface texture of workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05173-5>.

6. Palwinder Singh, Lakhvir Singh, Sehijpal Singh. Experimental Comparison of Abrasive Flow Machining and Magnetic Abrasive Flow Machining for Aluminium Tubes. *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)*, 2018, vol. 04, Iss. 03. DOI: 10.18231/2454-9150.2018.0410.

7. Butola R., Jain R., Bhangadia P., Bandhu A., Walia R.S., Murtaza Q. Optimization to the parameters of abrasive flow machining by Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 05, Iss. 02. DOI: 10.1016/J.MATPR.2017.12.044.

8. Novoselsky N. K., Vasileva E. K., Sysoev A. S. [Micro cutting during abrasive extrusion processing]. *The Scientific Heritage*, 2020, no. 44-1 (44). pp. 45–48 (in Russ.).

9. Wang Tingting, Chen De, Zhang Weihua, An Luling. Study on key parameters of a new abrasive flow ma-chining (AFM) process for surface finishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 101, Iss. 2, pp. 39–54. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2914-9>.

10. Pshenko E.B., Shestakov I.Ya., Shestakov V.I. The research of thermophysical properties of the working environment for abrasive-extrusion processing. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2019, vol. 20, no. 2, pp. 277–283.

11. Yinguang Li, Guizhen Song, Bowen Hon, Jianming Cheng. Study on the correlation between grain size and processing limit in abrasive flow machining. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Conf. Ser. 1884 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1884/1/012002.

12. Xiu Tian-Xun, Wang Wei, Liu Kun, Wang Zhi-Yong, Wei Dao-Zhu. Characteristics of force chains in frictional interface during abrasive flow machining based on discrete element method. *Advances in Manufacturing*, 2018, 6, pp. 355–375. <https://doi.org/10.1007/s40436-018-0236-7>.

13. Li Yinguang, Song Guizhen, Hon BOWEI, Cheng Jianming. Study on the correlation between grain size and processing limit in abrasive flow machining. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021.

14. Ragulin V.D., Bokova L.G. [Features of processing parts with complex geometric surfaces using unbound abrasives]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2020, no. 1, pp. 50–54 (in Russ.).

15. Kalimullina Z.A. [Abrasive materials, classification, types and their specifications]. *Alleja nauki*, 2018, no. 11, pp. 42–45 (in Russ.).

16. Babaev A.S., Laptev N.V., Stolov E.V., Semyonov A. R. [Application of robotized finish treatment in a free abrasive for aluminium cylinders]. *Aktualnye problemy v mashinostroenii*, 2018, no. 1-2, pp. 31–36 (in Russ.).

17. Scriabin V.A. [Fine grit treatment of rangy plates]. *Vestnik bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo-universiteta*, 2021, no. 9, pp. 15–22 (in Russ.).

18. Swarn Singh, Harish Kumar, Santosh Kumar, Saurabh Chaitanya. A systematic review on recent advancements in Abrasive Flow Machining (AFM). *Materials Today: Proceedings*, 2021. DOI 10.1016/j.matpr.2021.12.273

19. Chirov A.N., Sapegin A.M., Zhumabaev E.N., Sysoeva L.P., Shelikhova S.V. Abrasive extrusion processing of aluminum alloys. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2018, no. 8, pp. 30–33.

20. Karpachenko K.A. [Grinding as a type of abrasive treatment: types, cope, types of grinding tools and materials]. *Innovacionnye tekhnologii v mashinostroenii obrazovanii i ehkonomike*, 2020, no. 3, pp. 86–91 (in Russ.).

Type and Size Filler Grain Selection During Abrasive Flow Machining of Non-Ferrous Alloys Rectangular Parts

P.A. Ivanov, Post-graduate, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
V.A. Levko, DSc in Engineering, Associate Professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

Abrasive flow machining is one of the promising technologies for finishing rectangular channels, which are characterized by a constant increase in accuracy and reduction of surface roughness. During modeling of the contact interaction of grains in the corners of rectangular part cross-section in the intended abrasive flow machining, the key features of the size and filler grain selection were fixed. In the proposed spherical grain model, the cutting edge is represented by an arc of a circle that fits into the angle of the cross-section of the part. It is confirmed that if the grain size exceeds the value of the inner radius of the rounded corner of the part, an untreated zone appears, with the area calculated using the CAD system on a straight, blunt and sharp angle. It is proved that the abrasive flow machining with a filler grain size not exceeding the value of the doubled radius of the inner rounding of the rectangular cross section is carried out.

The physical properties, the shape of the cutting edges and the applicability of fillers, electrolytically produced corundum, silicon carbide and synthetic diamond were analyzed. The shape of a diamond grain, in comparison with the fillers mentioned above, shows a more rounded shape of the crystal faces, which causes greater microhardness and abrasive ability. The revealed features confirm the exclusion of a possible phenomenon, caricature in the process of post-processing. It is recommended to use abrasive grains of a certain grain size for uniform pretreatment of a rough surface, followed by polishing with an ointment-like diamond paste of channels of small transverse rectangular cross-section.

Using as a filler a salve-like paste containing diamond grains allows to reduce medium viscosity and machining corners of rectangular section. Abrasive flow machining with medium viscosity with synthetic heat-resistant rubber as the base and a salve-like paste containing diamond grains is used for finishing machining of non-ferrous parts.

The use of working media with diamond pastes will allow the internal channels of blanks made of various non-ferrous alloys to be treated with an abrasive flow.

For the minimum cross sections of rectangular pipe blanks presented in this article, it is proposed to use the working medium of the following weight composition: synthetic heat-resistant rubber - 40 %, salve-like diamond paste ASN 60/40 PTO – 60 %. A number of general recommendations are proposed for further research.

Keywords: abrasive flow machining, rectangular part, abrasive grain, filler, diamond paste.

Получено 18.03.2022

Образец цитирования

Иванов П. А., Левко В. А. Выбор вида и величины зерна наполнителя при обработке абразивным потоком прямоугольных заготовок из цветных сплавов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 2. С. 6–13. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-6-13.

For Citation

Ivanov P.A., Levko V.A. [Type and Size Filler Grain Selection During Abrasive Flow Machining of Non-Ferrous Alloys Rectangular Parts]. Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 6-13 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-6-13.