



Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена

© В.А. Левко, Д.И. Савин, О.В. Литовка

*Сибирский государственный университет науки и технологий
им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия*

Резюме: Цель – проанализировать контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости, выявить ряд общих явлений, характерных и для других методов обработки заготовок из сплавов порошкового молибдена, зафиксировать некоторые особенности этого процесса. Одной из проблем современного производства является механическая обработка деталей из труднообрабатываемых материалов, таких как сплавы молибдена. Для финишной обработки заготовок из молибденовых порошковых сплавов предложена обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей средой. Для этого уточнена модель удаления материала единичным абразивным зерном. В этой модели абразивное зерно представляет собой многолезвийный инструмент, воздействующий на обрабатываемую поверхность как по фактической площади контакта, так и по контурной. Подтверждено, что появление составляющих силы резания, действующей на единичное абразивное зерно, обусловлено касательными и нормальными напряжениями потока рабочей средой. Проанализированы особенности контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком заготовок из порошковых молибденовых сплавов. Для оценки исходного состояния поверхности перед финишной обработкой описан поверхностный слой заготовок из порошкового молибдена после токарной обработки и электроэрозионной вырезки проволокой с точки зрения исходного состояния. Обосновано проведение обработки абразивным потоком в два этапа с варьированием вида абразива и его зернистости. Экспериментально подтверждена возможность применимости обработки абразивным потоком высоковязкой средой для финишной обработки заготовок из порошкового молибдена. Выявлены особенности процесса обработки абразивным потоком с использованием рабочей среды высокой вязкости. Предложены рекомендации по использованию режимов обработки абразивным потоком для конкретных размеров отверстий в заготовках из порошкового молибдена.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, высоковязкая среда, сплав порошкового молибдена, контактное взаимодействие, шероховатость, абразивное зерно

Информация о статье: Дата поступления 25 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 26 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Левко В.А., Савин Д.И., Литовка О.В. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 36–51. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-36-51>

Powder molybdenum alloy workpieces contact interactions under abrasive flow machining by high viscosity media

Valery A. Levko, Dmitry I. Savin, Olga V. Litovka

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to analyze contact interactions under abrasive flow machining by a high viscosity medium, to reveal a number of common phenomena characteristic of other processing methods of molybdenum powder alloy workpieces, to describe some features of the process. One of the problems of modern production is mechanical processing of parts made of hard-to-work materials, e.g. molybdenum alloys. The abrasive flow machining by a high viscosity medium is proposed for finish processing of workpieces made of molybdenum powder alloys. For this purpose the model of material removal by a single abrasive grain is refined. This model presents an abrasive grain as a multi-blade tool that impacts the treated surface both on the actual contact area and contour. It is proved that the origination of the components of the cutting force that impacts a single abrasive grain is due to tangential and normal stresses of the work-

ing medium flow. Analysis is given to the features of contact interactions taking place under abrasive flow processing of molybdenum powder alloy workpieces. To assess the initial state of the surface before finishing the surface layer of molybdenum powder workpieces is described after turning and EDM wire cutting in terms of the initial state. Justification is given to abrasive flow treatment in two stages with varying the type of abrasive and its grain size. Experiments proved the possibility of using an abrasive flow of high viscosity medium for finishing treatment of molybdenum powder workpieces. The features of the abrasive flow processing using a high viscosity working medium are revealed. The recommendations are given on the use of abrasive flow treatment modes for specific sizes of holes in molybdenum powder workpieces.

Keywords: abrasive flow machining, high viscosity medium, molybdenum powder alloy, contact interaction, roughness, abrasive grain

Information about the article: Received November 25, 2019; accepted for publication December 26, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Levko VA, Savin DI, Litovka OV. Powder molybdenum alloy workpieces contact interactions under abrasive flow machining by high viscosity media. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):36–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-36-51>

1. ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие производства авиационной и ракетно-космической техники потребовало появления новых материалов, способных не терять свои эксплуатационные свойства при высоких температурах, близких к их температурам плавления, быть стойкими к различным агрессивным средам, а также обладать высокой износостойкостью. Основу таких материалов составили сплавы титана, кобальта, хрома и молибдена. Высокие эксплуатационные свойства таких сплавов обуславливают их низкую обрабатываемость резанием из-за особых характеристик, таких как низкая теплопроводность, высокая прочность при повышенных температурах, износостойкость и т.д. Кроме того, их высокая прочность, ударная вязкость, износостойкость и низкая теплопроводность приводят к быстрому износу металлорежущего инструмента и сокращению срока его службы [1].

Из-за высокой прочности при повышенных температурах таких сплавов нагрев материала, возникающий при обработке, слабо влияет на улучшение их обрабатываемости. Высокая динамическая прочность на сдвиг подобных материалов ведет к накоплению напряжений кристаллической решетки с дальнейшим образованием сколов. Низкая теплопроводность препятствует эффективному отводу тепла из зоны резания с последующей локализа-

цией температуры резания на режущей кромке инструмента. Низкая теплопроводность и высокий коэффициент трения при контактных взаимодействиях кромки режущего инструмента и обрабатываемой поверхности в условиях повышенных температур ведут к налипанию частичек материала к острию инструмента. Постепенное налипание частичек ведет к образованию нароста на режущей кромке, что ускоряет скорость износа [2]. Из-за присутствия легирующих элементов в микроструктуре рассматриваемых сплавов они содержат абразивные частицы, что также ведет к дополнительному износу режущего инструмента [1]. Кроме того, такие твердые частицы не способны пластически деформироваться во время механической обработки и выкрашиваются с поверхности заготовки, оставляя за собой дефект поверхности. Далее в ходе процесса обработки эта частица в виде стружки с высокой вероятностью налипает либо на обрабатываемую поверхность, нарушая ее целостность, либо на режущую кромку инструмента [3].

Исследования микрофрезерования наружной поверхности чистого молибдена позволили установить такие параметры обработки, при которых получено высокое качество поверхности $Ra=0,25$ мкм. При этом выявлено налипание микрочастиц молибдена на режущую кромку фрезы. Из рентгеноструктурного анализа образца с лучшими результатами обработки установлено, что значение остаточного напряже-



ния $\sigma_\theta = -0,12 \pm 0,02$ ГПа, т.е. процесс обработки, привел к сжатию материала чистого молибдена [4].

Сплавы из порошкового молибдена, имея свойства обычного молибдена, отличаются некоторыми характеристиками. Ключевые особенности данных сплавов – более высокая механическая прочность (износостойкость) и твердость при высоких температурах [5].

Сравнение характеристик сплава из порошкового молибдена SinteredMo, углеродистой стали AISI 1045 (Ck45) и хромоникелевого сплава Inconel 718, показывает, что сплавы из порошкового молибдена обладают более высокой плотностью $10,28 \text{ г/см}^3$, температурой плавления 2620°C , величиной модуля Юнга $800\text{--}1200$ ГПа, относительным удлинением $<30\%$ и высокой теплопроводностью $140 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. В тоже время у этого сплава существенно ниже коэффициент линейного теплового расширения – $5,2 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$, удельная теплоемкость $254 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ [5].

Опыт экспериментальной токарной обработки порошкового молибдена различными резцами без применения смазывающе-охлаждающих жидкостей показал, что этот вид обработки позволил получить шероховатость поверхности до $Ra=1,45$ мкм. Установлен большой эквивалентный коэффициент трения, по сравнению с обычными углеродистыми сталями, а также повышенная склонность к адгезии и пластическому оттеснению при контактных взаимодействиях режущей кромки и стружки. При этом силы резания в целом были немного выше и находились под сильным влиянием нормального переднего угла. Выявлено, что доминирующим механизмом износа всех видов инструмента было окисление режущей кромки, а максимальную стойкость кромки (32 мин при скорости резания 215 м/мин) обеспечили сочетание увеличенной положительной геометрии (угла резания) и полировка поверхности кромки [5].

При исследовании особенности процесса стружкообразования при токарной обработке наружной поверхности об-

разцов из молибденового сплава установлено наличие сжимающих тангенциальных остаточных напряжений. Молибденовый сплав в процессе стружкообразования ведет себя как пластичный материал, а при формировании поверхностного слоя – как материал пониженной пластичности [6].

Для ряда заготовок из молибденовых сплавов целесообразно применение дополнительной финишной обработки их внутренних поверхностей. Поскольку такая обработка имеет дополнительные сложности, связанные с затрудненным доступом лезвийного инструмента и его быстрым износом, для этих целей все большее применение получают нетрадиционные методы финишной обработки. В качестве инструмента в этих методах применяется поток разнообразных жидкостных или уплотненных сред, несущих рабочие элементы, которые при перемещении вдоль обрабатываемой поверхности вступают в контакт с ее неровностями [7].

Так, в производстве полупроводниковой техники применяют способ финишной обработки абразивными зёрнами, прокачиваемыми в коллоидной жидкости. Эта жидкость представляет собой кислую водную среду (рН от 3 до 6), содержащую водорастворимый поверхностно-активный материал и окислитель (перекись водорода) [8]. В этом решении механизм удаления материала можно классифицировать как разновидность комбинированной струйной абразивно-жидкостной обработки. Поток рабочей среды представляет собой низковязкую среду, способную к проявлению при течении в обрабатываемом канале лишь небольших упругих деформаций. Производительность обработки и величина шероховатости обработанной поверхности при этом не удовлетворяют требованиям современного производства.

Анализ публикаций показал, что отсутствует опыт применения обработки абразивным потоком деталей из молибденовых сплавов. Целью данного исследования является обоснование применения способа обработки абразивным потоком высоковязкими рабочими средами для повышения

производительности финишной обработки и снижения шероховатости внутренних поверхностей деталей из молибденовых порошковых сплавов.

2. КОНТАКТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ

Основу рассматриваемого метода положил способ экструзионного хонингования или абразивной обработки внутренней поверхности, заключающийся в сжимающем давлении на обрабатываемую поверхность при абразивном контакте с ней полутвердого, труднотекучего полимерного материала. Этот материал состоит из силиконовой среды, наполненной мелкодисперсными абразивными частицами. Среда под давлением становится текучим, почти твердым сгустком, образуя прочную матрицу. При течении поток рабочей среды удерживает под давлением полимерный материал в ограниченном абразивном контакте с обрабатываемой поверхностью [9].

Описанию контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком посвящен ряд работ. Экспериментальное исследование сил резания и абразивной способности зерна во время обработки абразивным потоком позволило установить, что давление экструзии, концентрация абразива и размер зерна влияют на силы резания, абразивную способность и, наконец, на уменьшение шероховатости поверхности. При этом основным механизмом удаления материала являются трение и пластическое оттеснение [10].

Аналогичный вывод был сделан в ходе теоретических расчетов сил, возникающих при деформации материала при обработке абразивным потоком. Теоретические расчеты подтверждены экспериментальными исследованиями обработки мягкой стали и алюминиевого сплава [11]. Следует отметить, что результаты исследований [10, 11] получены обработкой абразивным потоком заготовок средой низкой и средней вязкости. Давление экструзии при этом варьировалось в диапазоне от 2

МПа до 8 МПа.

В работе исследователей из Индии приведен критический анализ современного состояния процесса обработки (отделки) абразивным потоком [12]. Отмечено, что обработка абразивным потоком может быть использована для финишной обработки различных материалов. С ее помощью обеспечивается надежная, равномерная, повторяемая и точная отделка поверхности с удалением очень небольшого слоя материала.

Пластичность и твердость обрабатываемой детали оказывают большое влияние на процесс обработки абразивным потоком. Рабочая среда должна быть самодформируемой, вязкоупругой и неньютоновской жидкостью с очень высоким коэффициентом восстановления. Более высокая вязкость среды увеличивает закрепленность абразивных частиц в полимере, что увеличивает производительность обработки. Однако приведенные в данной работе зависимости производительности съема материала и шероховатости поверхности носят эмпирический характер либо основаны на формальной интерпретации геометрических характеристик абразивных зерен и микронеровностей обрабатываемой поверхности [12].

В другой работе приведена схема (рис. 1), иллюстрирующая механизм удаления материала заготовки во время обработки абразивным потоком [13]. Предложенная иллюстрация процесса является упрощенной как с точки зрения структуры поверхности, так и учета соотношения размеров шероховатости (микронеровности) заготовки и абразивных зерен.

Таким образом, максимальная исходная шероховатость поверхности после получения заготовок составляет $Ra = 80 - 40$ мкм. Как правило, перед операциями финишной обработки шероховатость поверхности варьируется в пределах $Ra = 2,5 - 1,25$ мкм. Размер абразивных зерен, применяемых в обработке абразивным потоком, колеблется в пределах от 40 мкм (завершающая стадия обработки) до 500 мкм (начальная стадия обработки). Размер аб-

разивных зерен имеет прямую зависимость от величины исходной шероховатости заготовки, твердости обрабатываемого материала и вязкости рабочей среды.

Более точная схема была предложена при разработке расчетной модели удаления материала при обработке абразивным

потоком [14]. В ней обобщен опыт предыдущих разработок и предложена схема приложения сил на единичное абразивное зерно, а также принципиальная схема удаления материала модели единичным абразивом (рис. 2).

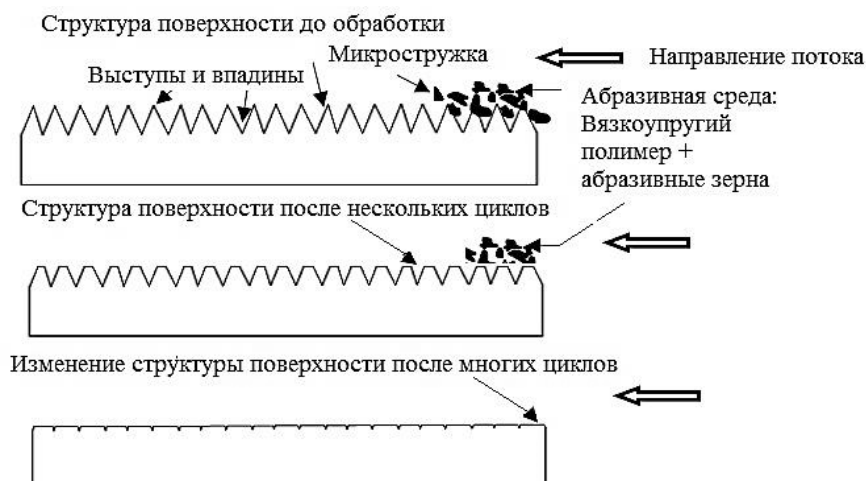


Рис. 1. Механизм удаления материала в процессе обработки абразивным потоком [13]
Fig. 1. Mechanism of material removal under abrasive flow machining [13]

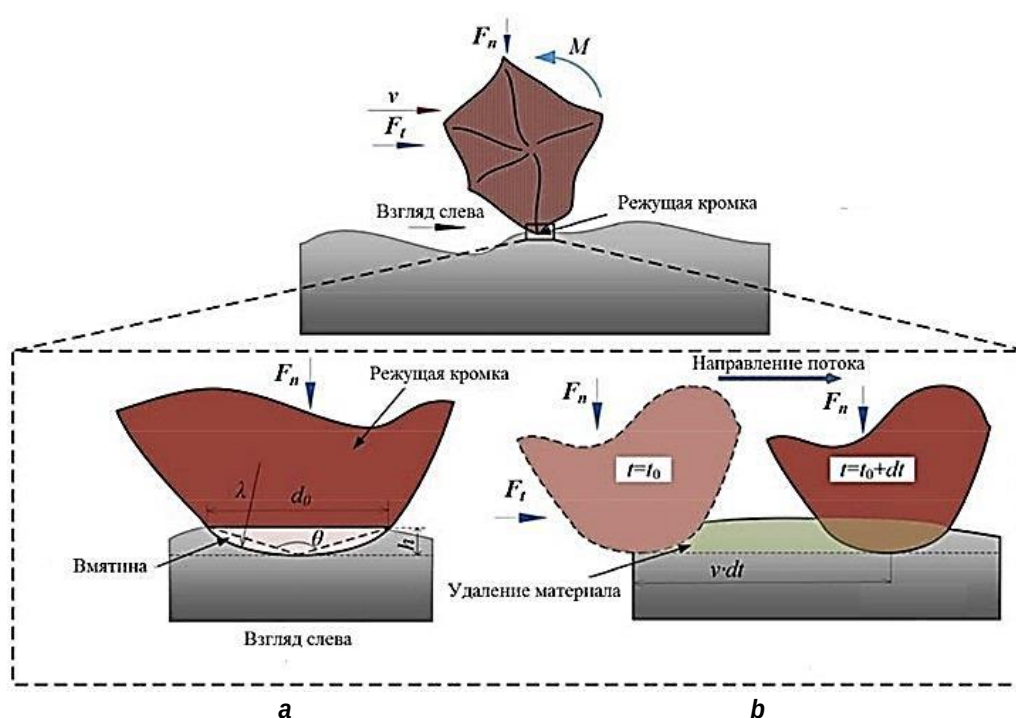


Рис. 2. Принципиальная схема модели удаления материала единичным абразивным зерном:
а – вдавливание в заготовку под действием нормальной составляющей силы резания (F_n);
б – удаление материала единичным абразивным зерном [14]

Fig. 2. Schematic diagram of the material removal model by a single abrasive grain:
а – indentation into a workpiece under the action of a normal component of the cutting force (F_n); б – material removal by a single abrasive grain [14]

Под действием нормальной F_n и тангенциальной F_t составляющих сил резания, возникающих при движении в потоке среды единичного абразивного зерна со скоростью v , это зерно вступает в контакт с неровностью заготовки. Под действием нормальной составляющей F_n абразивное зерно внедряется в заготовку на глубину h , образуя вмятину длиной d_0 . Размер вмятины также зависит от радиуса вершины кромки зерна λ и максимального угла θ между двумя линиями, соединяющих нижнюю точку вмятины и две точки на верхней кромке вмятины. В начальное время $t = t_0$ происходит контакт выступа зерна и неровности заготовки с проявлением момента сил M . За счет F_t абразивное зерно перемещается в направлении потока среды. Длина контакта определяется как производная скорости абразивного зерна по времени dt [14].

Для анализа контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком деталей из сплавов порошкового молибдена рассмотренная принципиальная схема (см. рис. 2) требует уточнения.

Первое уточнение связано с масштабным коэффициентом, так как контакт «микронеровность заготовки – абразивное зерно» происходит как на уровне абразивного зерна в целом, так и ее отдельных микровыступов (режущих кромок).

Второе уточнение обусловлено вязкостью рабочей среды. Экспериментальное исследование процесса обработки абразивным потоком высокой вязкости установило, что сила резания единичным абразивным зерном, определяемая как сумма радиальной и тангенциальной (осевой) составляющих, наиболее чувствительна к изменению величины давления экструзии. При этом увеличение, как вязкости рабочей среды и давления экструзии, положительно влияет на радиальную составляющую силы резания, но отрицательно – на тангенциальную (осевую) составляющую силы резания единичным зерном [15]. Этот факт влияет на величину и направление резуль-

тирующей силы резания.

Третье уточнение требует учитывать вид абразивного зерна и его зернистость. Исследования поверхности абразивных зерен после взаимодействия с молибденом в условиях микроцарапания показали, что зерна корунда и карбида кремния при микроцарапании молибдена изнашиваются в результате истирания и микроскалывания [16]. Молибден переносится на поверхность площадки износа корунда, как и на поверхность карбида кремния, и концентрируется вблизи трещин и других дефектов, образующихся на поверхности корунда. При этом корунд после взаимодействия с молибденом подвергается большей модификации по сравнению с карбидом кремния, что отражается в развитости поверхности площадки износа (сочетание рисок и элементов микровыкрашивания) [16].

Четвертое уточнение вызвано структурой материала деталей из порошкового молибдена. Сплав порошкового молибдена М-МП должен содержать не менее 92% зерен размером до 5 мкм¹. Такая структура оказывает сильное влияние на процесс обработки. Данный сплав имеет плотность 10,2 г/см³, температуру плавления 2610°C, теплопроводность 142 Вт/(м·К), удельную теплоемкость 0,256 Дж/(кг·К) и коэффициент линейного теплового расширения 4,9 10⁻⁶·К⁻¹. Твердость сплава порошкового молибдена М-МП по Бринеллю – 125 НВ, а величина модуля Юнга – 336,6 ГПа¹.

Два первых уточнения схемы контакта являются универсальными относительно любого вида материала при обработке абразивным потоком. Третье и четвертое уточнения отражают специфику контактных взаимодействий при обработке деталей из молибденовых сплавов.

При обработке абразивным потоком единичное абразивное зерно вступает в контакт с поверхностью детали. При этом образуется контурная площадь касания A_c , на которой возникает контурное давление равное отношению силы, действующей на

¹ГОСТ 17432-72. Материалы порошковые. Прутки и поковки из сплава марки М-МП. Технические условия. Введ. 01.01.1974. М.: Изд-во стандартов, 1992.

контактирующие тела, к контурной площади касания $p_c = N / A_c$. Масштабный коэффициент абразивного зерна и шероховатости поверхности (рис. 3) демонстрирует, что из-за больших размеров абразивное зерно одновременно находится в контакте с целым рядом микронеровностей. При этом на каждой микронеровности образуется элементарная фактическая площадь касания $A_{r,i}$. Суммарная площадь контактных зон микронеровностей абразивного зерна и обрабатываемой поверхности образует фактическую площадь касания [17].

Абразивное зерно в пределах контурной площади касания воздействует на все единичные микронеровности обрабатываемой поверхности в целом, а также на каждую единичную микронеровность отдельным выступом, представляющим собой режущую кромку. Угол таких кромок зависит от вида и величины абразивного зерна.

Вид контакта определяется отношением величины сближения контактирующих

тел h и радиуса скругления вершины микронеровности R .

Известные из трибологии условия перехода с одного вида контакта на другой предложены для оценки вида контакта при обработке абразивным потоком формулы (1)–(4) [17].

Упругий контакт:

$$\frac{h}{R} < 0,01. \quad (1)$$

Упруго-пластический контакт:

$$\frac{h}{R} \geq 2,4(1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E} \right)^2. \quad (2)$$

Пластический ненасыщенный:

$$\frac{h}{R} \geq 5,4(1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E} \right)^2. \quad (3)$$

Микрорезание:

$$\frac{h}{R} \geq 14,5(1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E} \right)^2. \quad (4)$$

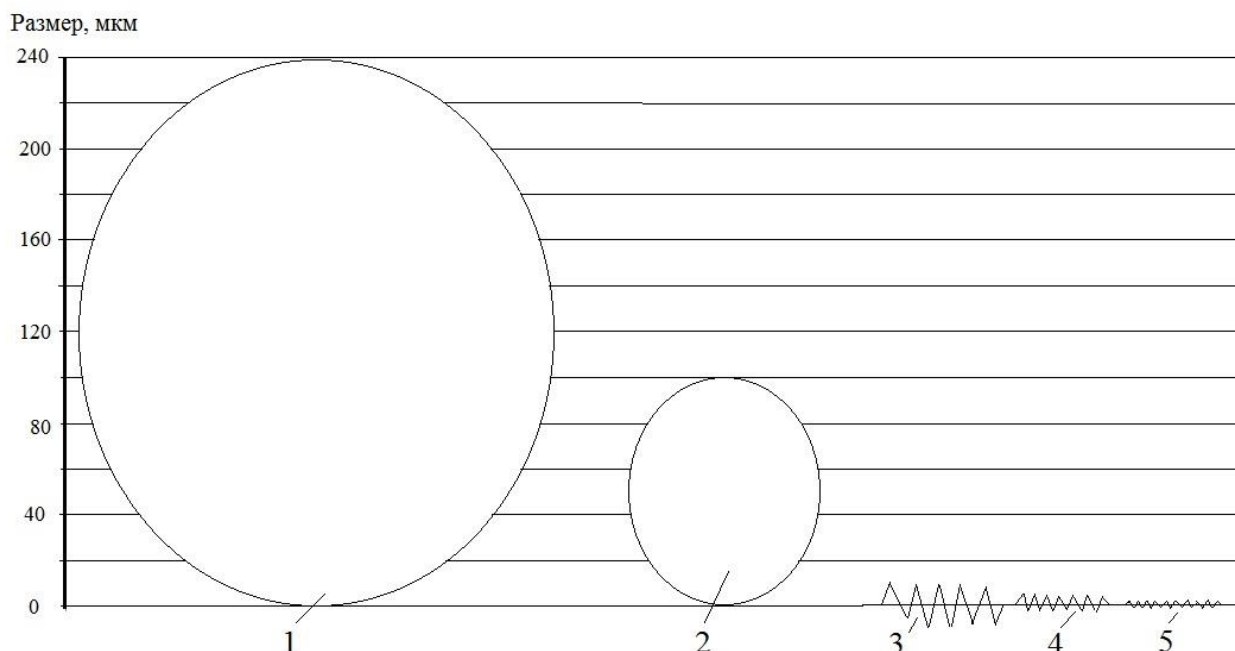


Рис. 3. Масштабный коэффициент абразивного зерна и шероховатости поверхности:
1 – зерно размером 240 мкм; 2 – зерно размером 100 мкм; 3 – шероховатость $Ra = 10$ мкм;
4 – шероховатость $Ra = 5$ мкм; 5 – шероховатость $Ra = 2,5$ мкм

Fig. 3. Scale coefficient of an abrasive grain and surface roughness: 1 – grain of the size of 240 μm; 2 – grain of the size of 100 μm; 3 – roughness $Ra = 10$ μm; 4 – roughness $Ra = 5$ μm; 5 – roughness $Ra = 2.5$ μm

В рассмотренной выше принципиальной схеме модели удаления материала единичным абразивным зерном (см. рис. 2), зерно в контакте имеет одну режущую кромку. В действительности абразивное зерно представляет собой многолезвийный инструмент, воздействующий на обрабатываемую поверхность как по фактической площади контакта (режущими кромками), так и по контурной площади контакта (зерно в целом).

Второе уточнение расчетной схемы необходимо для расчета нормальной F_n и тангенциальной F_t составляющих силы резания. На основании обобщенной модели Максвелла было проведено моделирование потока среды при обработке абразивным потоком путем решения стационарных неупругих уравнений Навье-Стокса [18]. Авторами этой работы отмечены сложность решаемой задачи и необходимость дальнейшего совершенствования данной модели из-за существенного расхождения расчетных и экспериментальных скоростей и давлений потока рабочей среды.

Применение неупругих уравнений Навье-Стокса для неньютоновских сред дает удовлетворительные результаты при моделировании обработки абразивным потоком рабочими средами малой вязкости [19, 20]. Модель течения в этом случае по-

строена на перепаде давления в обрабатываемой детали, а рабочая среда подается с постоянным расходом из накопительной емкости.

Анализ ряда работ [21, 22], направленных на разработку теоретических моделей расчета нормального давления на внутренней поверхности круглой трубы и скорости скольжения стенки при обработке абразивным потоком, в случае применения высоковязких рабочих сред дает серьезные расхождения с экспериментальными наблюдениями. В этом случае в процессе обработки участвует весь объем рабочей среды 4, продавливаемый штоками рабочих цилиндров 1 установки через обрабатываемую деталь 3, закрепленную в приспособлении 2 (рис. 4).

В начале обработки, когда объем абразивной среды в рабочем цилиндре находится в недеформируемом состоянии, расположение абразивных зерен носит случайный характер. При приложении давления шток начинает воздействовать на рабочую среду. Волна напряжения в вязкоупругой среде начинает передаваться в направлении от штока к свободному краю среды. При достижении определенной величины напряжения сдвига τ_0 среда начинает течение сдвига. При этом формируется поток с определенной внутренней струк-

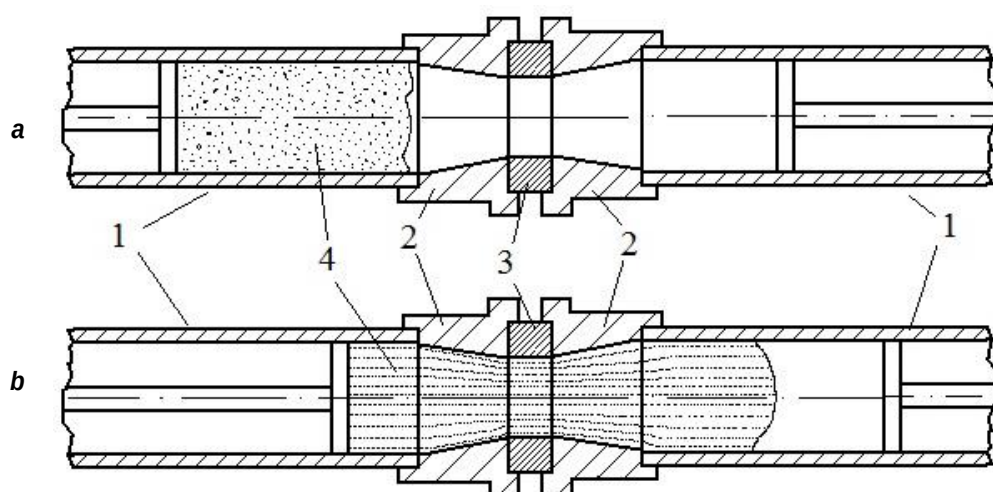


Рис. 4. Схема обработки абразивным потоком средой высокой вязкости:
 а – в начале обработки; б – в процессе обработки абразивным потоком

Fig. 4. Diagram of abrasive flow machining by high viscosity media:
 a – at the beginning of processing; b – during abrasive flow machining

турой, характеризующейся возникновением линий тока. В каждой линии тока абразивные зерна выстраиваются в определенной последовательности, образуя силовые цепочки. Формирование таких цепочек на поверхности трения при абразивной обработке в целом описано в работе, посвященной моделированию характеристик силовых цепей на основе метода дискретных элементов [23].

Проведенные ранее визуальные исследования данного процесса обработки позволили установить, что при обработке в потоке рабочей среды отдельные абразивные зерна перемещаются по линиям тока. При этом наблюдался эффект образования силовых абразивных цепочек [24], тем самым экспериментально подтверждая ранее выдвинутое предположение об образовании таких цепочек при обработке абразивным потоком [25]. Таким образом, появление составляющих силы резания, действующей на единичное абразивное зерно, обусловлено касательными и нормальными напряжениями потока рабочей среды.

Для определения величины составляющих сил резания предложено привести к площади поперечного сечения единичного зерна касательные и нормальные напряжения [26]:

$$F_n = \sigma S_{az} \text{ и } F_t = \tau S_{az}, \quad (5)$$

где S_{az} – площадь поперечного сечения абразивного зерна, м^2 ; σ – нормальные напряжения, Па; τ – касательные напряжения, Па.

Численные значения напряжений в потоке высоковязкой среды могут достигать величин порядка $3 \cdot 10^5$ Па. При этом сам поток перемещается с небольшой скоростью.

Единичное абразивное зерно при обработке абразивным потоком представляет собой многогранный керамический инструмент. При его контакте с микронеровностями обрабатываемой поверхности могут возникать различные виды контакта. Вид контакта зависит от твердости и шероховатости обрабатываемой поверхности и абразивного зерна. Как правило, на уровне микровыступов зерна происходят микрорезание и пластическое отеснение, а на уровне абразивного зерна – упругая и пластическая деформации.

В процессе контакта абразивные зерна могут раскрашиваться, а их режущие кромки затупляться. Это предположение подтверждено экспериментально при исследовании износа абразивных сред и его влияния на результаты обработки абразивным потоком (рис. 5) [27].

В ходе многократной экструзии рабочей среды при обработке абразивные зерна могут перемещаться не только в осевом направлении вдоль обрабатываемой

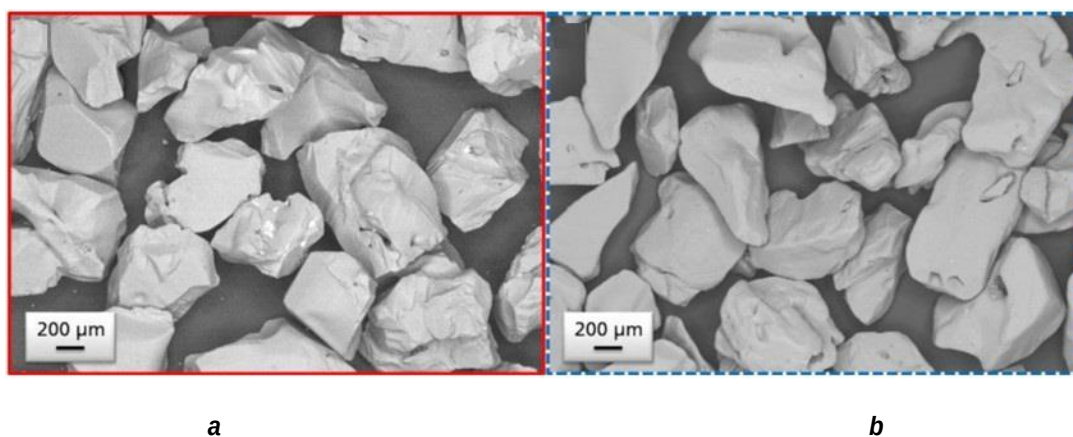


Рис. 5. Изображение абразивных частиц размером > 200 мкм под электронным микроскопом:
а – до обработки; б – после обработки абразивным потоком [27]

Fig. 5. Image of abrasive particles of the size $> 200 \mu\text{m}$ under an electron microscope:
a – before machining; b – after abrasive flow machining [27]

поверхности, но и при определенных условиях в радиальном направлении. При этом зерна, вступавшие в контакт с поверхностью, становятся неактивными, а на их место смещаются зерна из центральной части потока.

3. ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ МОЛИБДЕНОВЫХ СПЛАВОВ

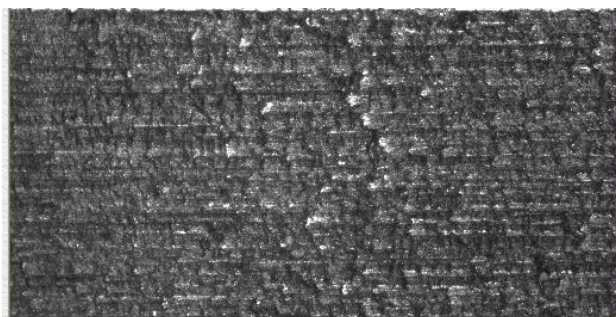
Состояние поверхностного слоя заготовки из порошкового молибдена определяется размером частиц порошка молибдена (диаметр до 5 мкм) и видом предшествующей обработки. Таким образом, при токарной обработке заготовки из молибденового сплава марки М-МП получена шероховатость поверхности $Ra = 1,6$ мкм (рис. 6 а).

Полученная поверхность представляет собой сочетание рисок и выступов, сориентированных в направлении движения резца. Структура рисок и выступов характерна для контакта при токарной обработке с резанием материала на уровне кромки резца в целом, и выкрашивания ча-

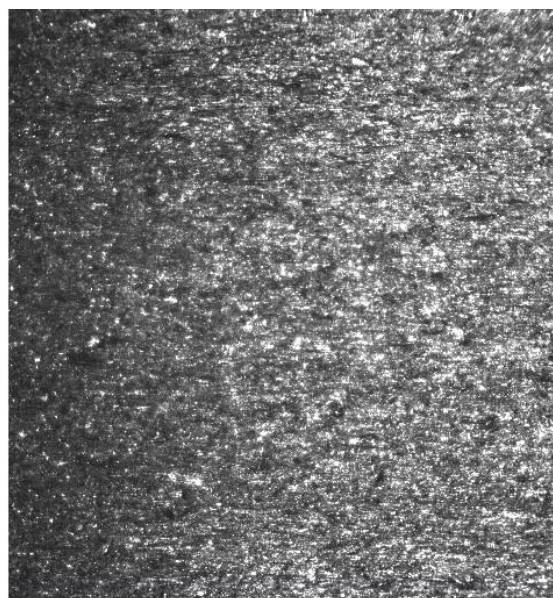
стиц порошкового молибдена на микроуровне. На поверхности риск и выступов виден комплекс круглых микронеровностей, образованных спеченными и спрессованными частичками порошка молибдена.

Аналогичные микронеровности, образованные частичками порошка молибдена, видны и на поверхности полученной электроэрозионной вырезки проволокой (рис. 6 б). При этом риски и выступы имеют сглаженную форму со следами оплавления. Шероховатость поверхности после электроэрозионной вырезки проволокой составляет $Ra = 1,6$ мкм.

Зарубежный опыт механической обработки молибдена показывает, что для заготовок из обычного молибдена можно обеспечить шероховатость до $Ra = 0,25$ мкм [4]. Для заготовок из порошкового молибдена эта величина значительно больше – $Ra = 1,45$ мкм [5]. Пониженная пластичность молибдена при формировании его поверхностного слоя, отмеченная как особенность процесса стружкообразования при резании молибденового сплава [6], обусловлена особенностью контактных взаимодействий.



а



б

Рис. 6. Поверхность заготовки из порошкового молибденового сплава: а – после токарной обработки; б – после электроэрозионной вырезки проволокой

Fig. 6. Surface of the workpiece made of molybdenum powder alloy: а – after turning; б – after EDM wire cutting



Они основаны на выкрашивании частиц порошкового молибдена из основного слоя заготовки по границам их раздела. Минимальный размер отделяемой стружки при этом составляет размер частицы порошка.

Установлено, что при обработке абразивным потоком отделяемые частицы порошкового молибдена удаляются из зоны обработки, попадая либо в полимерную основу рабочей среды либо налипая на одну из кромок абразивного зерна. На контурной площади контакта единичного абразивного зерна возникают, как правило, упругие деформации. На фактической площади контакта отдельные микронеровности поверхности испытывают пластические деформации, а на уровне микровыступов единичного зерна возникают условия и для выкрашивания частиц молибдена.

Исходя из этих особенностей контакта, в два этапа проведена обработка абразивным потоком заготовки из порошкового молибденового сплава М-МП. Исходное состояние поверхности после электроэрозионной вырезки проволокой (рис. 6 б) имеет шероховатость $Ra = 1,6$ мкм.

Задачей первого этапа являлось удаление с поверхности дефектного слоя, полученного предыдущей обработкой, и подготовка поверхности под финишную обработку. Структура дефектного слоя, который необходимо удалить или уменьшить, описана выше. Выступы, по сравнению с основным материалом, имеют меньшую стойкость к абразивному воздействию. Следовательно, при обработке на первом этапе возможно создание большего количества площадок фактического контакта «абразивное зерно – молибден». Возрастание количества площадок фактического контакта ведет не только к уменьшению размеров выступов, но и к образованию большего количества новых микронеровностей. Эти микронеровности имеют меньший радиус скругления. При этом прочностные свойства становятся выше, но они все остаются меньшими по сравнению с основным материалом.

Для обработки на первом этапе

применен нормальный электрокорунд с большей зернистостью. Зерна электрокорунда, по сравнению с карбидом кремния, характеризуются большим количеством микровыступов с острыми кромками, а также большей склонностью к скалыванию этих микровыступов. Общая теория абразивной обработки говорит о том, что при каждом контакте происходит истирание кромок абразива, ведущей к увеличению ее режущего угла. Скалывание микровыступов, принявших участие в контакте, располагает к образованию новых острых граней, а также удалению налипших частичек молибдена. На этом этапе основным механизмом удаления материала является выкрашивание частичек молибдена поверхностного слоя. При этом происходит незначительное пластическое деформирование.

В результате обработки абразивным потоком высоковязкой средой на основе синтетического термостойкого высокомолекулярного каучука СКТ с добавлением электрокорунда нормального зернистостью F40 и давлением экструзии 12 МПа удалось получить шероховатость поверхности $Ra = 1,45–1,5$ мкм. Обработка зернами нормального электрокорунда большой зернистостью позволила образовать большее, по сравнению с исходной поверхностью, количество потенциальных площадок фактического контакта, приходящихся на контурную площадь контакта.

Задачей второго этапа являлось формирование поверхностного слоя, образованного радиусами скругления частичек порошка молибдена. Так как площадок фактического контакта, приходящихся на номинальную контурную площадь контакта, стало больше, зернистость абразива можно уменьшить, а его микротвердость и абразивную способность взять большими по величине. По отношению к электрокорунду таким абразивом является карбид кремния.

Поскольку высота неровностей поверхности уменьшилось, а их количество возросло, условия контактных взаимодействий на втором этапе изменились. Микровыступы зерна карбида кремния имеют больший радиус. Они более стойкие к ска-

ливанию. В связи с этим наряду с выкрашиванием в формировании поверхности большую роль начинает играть и пластическая деформация.

Для обработки абразивным потоком на втором этапе использована высоковязкая рабочая среда, в которой использованы зерна карбида кремния зернистостью F8. Величина давления экструзии – 12 МПа. Получена шероховатость поверхности заготовки $Ra = 1,3\text{--}1,4$ мкм (рис. 7). Ее текстура характеризуется отсутствием выступов и рисок, чьи размеры были бы значительно больше средней шероховатости.

Результаты обработки подтверждают применимость технологии обработки абразивным потоком заготовок из порошкового молибдена.

Обработку абразивным потоком средой высокой вязкости можно применять для финишной обработки заготовок для дюз и сопел. Дюзы из порошкового молибдена применяются в электронно-лучевых установках для распыления газов и жидкостей, в промышленных агрегатах – для напыления тонких металлических пленок. Подобные дюзы входят в конструкции краскопультов и покрасочных машин, а также применяются на стекольных производствах для выдувки различных изделий.

В зависимости от типа дюзы диаметр ее отверстия или отверстий может варьироваться в диапазоне от 3 до 25 мм,

длина отверстий – от 20 до 70 мм. Подобные размеры отверстий позволяют проводить обработку на установках с диаметром рабочих цилиндров до 25 мм. Объем применяемой для обработки рабочей среды высокой вязкости при этом составляет $1,5 \cdot 10^{-4}$ м³. В связи с высокой вязкостью рабочей среды давление экструзии рабочих цилиндров рекомендуется устанавливать на максимальных значениях – 12 МПа. Другие рекомендации по использованию режимов обработки абразивным потоком для конкретных размеров отверстий в заготовках из порошкового молибдена приведены в таблице.

При изменении формы или площади сечения обрабатываемого отверстия абразивный поток перестраивает свой профиль соответствующим образом. Поэтому, если в конструкторской документации на изделие запрещается наличие фасок на входе и выходе отверстия, рекомендуется использование дополнительных вкладышей с отверстием. С одной стороны отверстие вкладыша имеет одинаковые параметры с отверстием обрабатываемой заготовки и плотно прижимается к нему во время монтажа приспособления. С другой стороны вкладыша отверстие может быть большего диаметра. Профиль абразивного потока, необходимый для обработки отверстия заготовки, формируется на входе в отверстие вкладыша, образуя там фаску.



Рис. 7. Поверхность детали из порошкового молибденового сплава
после обработки абразивным потоком

Fig. 7. Surface of the workpiece made of molybdenum powder alloy after abrasive flow machining



**Рекомендации по использованию режимов обработки абразивным потоком
для конкретных размеров отверстий в заготовках из порошкового молибдена**
**Recommendations on the use of abrasive flow machining
for specific hole sizes in workpieces from molybdenum powder alloy**

Диаметр отверстия, мм	Этап обработки	Абразив	Количество абразива, %	Количество циклообра- ботки	Шероховатость Ra, мкм	
					до	после
до 15	первый	нормальный электрокорунд F40	40	40	1,6	1,45–1,5
до 15	второй	карбид кремния F8	40	35	1,45–1,5	1,3–1,4
от 15 до 25	первый	нормальный электрокорунд F40	50	40	1,6	1,45–1,5
от 15 до 25	второй	карбид кремния F8	50	35	1,45–1,5	1,3–1,4
свыше 25	первый	нормальный электрокорунд F40	60	40	1,6	1,45–1,5
свыше 25	второй	карбид кремния F8	60	35	1,45–1,5	1,3–1,4

Аналогично профиль абразивного потока меняется и на выходе обрабатываемого отверстия, образуя фаску и на этой кромке. Применение дополнительного вкладыша на выходе обрабатываемого отверстия заготовки позволяет исключить образование нежелательной фаски.

Если в конструкции заготовки имеется несколько отверстий, то и дополнительные вкладыши должны иметь такое же количество отверстий, совпадающих по своим характеристикам с обрабатываемыми отверстиями.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости выявил ряд общих явлений, характерных и для других методов обработки заготовок из сплавов порошкового молибдена, и некото-

рые особенности этого процесса.

К основным особенностям процесса обработки абразивным потоком рабочей среды высокой вязкости стоит отнести:

- отвод рабочей средой отделяемых частиц молибдена из зоны обработки;
- самозатачивание абразивных зерен за счет скалывания их граней;
- периодическая смена активных абразивных зерен в процесс многократной экструзии рабочей среды;
- разные виды контактных взаимодействий на контурной и фактической площади контакта абразивного зерна и обрабатываемой поверхности;
- возможность менять условия контакта за счет применения последовательной обработки рабочими средами разных составов.

Рассмотренный метод применим для финишной обработки заготовок из порошкового молибдена.

Библиографический список

1. Zaman H.A., Sharif S., Dong-Won Kim, Idris M.H., Suhaimi M.A., Tumurkhuyag Z. Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys – A

Review // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 563–570. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.150>
2. Kishawy H.A., Hosseini A. Machining Difficult-to-Cut

- Materials // Materials Forming, Machining and Tribology. 2018. P. 97–137. [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-95966-5_4 https://doi.org/10.1007/978-3-319-95966-5_4 (12.01.2019).
3. Ulutan D., Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51. Issue 3. P. 250–280. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003>
4. Mouralova K., Benes L., Prokes T., Zahradnicek R., Bednar J., Otoupalik J., et al. Micro-milling machinability of pure molybdenum // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 102. P. 4153–4165. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03524-5>
5. Sortino M., Totis G., Prosperi F. Dry turning of sintered molybdenum // Journal of Materials Processing Technology. 2013. Vol. 213. Issue 7. P. 1179–1190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.017>
6. Промптов А.И. Особенности процесса стружкообразования при резании молибденового сплава // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 2. С. 32–36.
7. Левко В.А., Симакова А.Е., Савин Д.И. Повышение эффективности обработки абразивным потоком за счет управления факторами жизненного цикла рабочей среды // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18. № 4. С. 932–938.
8. Mohammadian N., Turenne S., Brailovski V. Surface finish control of additively manufactured Inconel 625 components using combined chemical-abrasive flow polishing // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 252. P. 728–738. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.020>
9. Patent no. 3521412, U.S., ISC B24B 1/00, 19/00. Method of honing by extruding / McCarty R.W. Filed 12.04.1968; published 21.07.1970.
10. Gorana V.K., Jain V.K., Lal G.K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004. Vol. 44. Issue 2–3. P. 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.10.004>
11. Gorana V.K., Jain V.K., Lal G.K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining // Wear. 2006. Vol. 260. Issue 1–2. P. 128–139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.038>
12. 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. Issue 1. P. 741–782. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>
13. Kumar S.S., Hiremath S.S. A Review on Abrasive Flow Machining (AFM) // Procedia Technology. 2016. Vol. 25. P. 1297–1304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.224>
14. Wei Haibo, Peng Can, Gao Hang, Xuanping, Xuyue Wang. On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasive flow machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2019. Vol. 138. P. 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.12.003>
15. ZhangKe Hua, DingJin Fu, XuYong Chao. Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM) // Advanced Materials Research, 2013. Vol. 797. P. 390–395. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.797.390>
16. Носенко В.А., Авилов А.В., Ладыгина О.М., Кузнецов С.П. Поверхность корунда после взаимодействия с молибденом в условиях микроцарапания на скорости 60 м/с // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 10. С. 39–44
17. Левко В.А. Контактные процессы при абразивно-экструзионной обработке // Металлообработка. 2008. № 3. С. 19–23.
18. Uhlmann E., Schmiedel C., Wendler J. CFD Simulation of the Abrasive Flow Machining Process // Procedia CIRP. 2015. Vol. 31. P. 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.091>
19. 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. Issue 2. P. 39–54. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2914-9>
20. Zhu Li Feng, Wang Kai, Wu Huan, Xiu Dong, Sun Li Zhong. Research on the Methods for Common-Rail Pipe Holes Abrasive Flow Machining // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 721. P. 122–126. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.721.122>
21. Wu Ming Yu, Gao Hang. The Research of Extruded Pressure Auto-Adjustment Method in Abrasive Flow Polishing // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1027. P. 203–207. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1027.203>
22. Dash R., Maity K. Simulation of abrasive flow machining process for 2D and 3D mixture models // Frontiers of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 10. P. 424–432. <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0366-6>
23. 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. Vol. 6. P. 355–375. <https://doi.org/10.1007/s40436-018-0236-7>
24. Левко В.А., Лубнин М.А., Снетков П.А., Пшенко Е.Б., Турилов Д.М. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2009. № 4. С. 138–145.
25. Левко В.А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2008. № 2. С. 85–94.
26. Левко В.А. Особенности реологии при абразивно-экструзионной обработке // Вестник Сибирского



государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2005. № 7. С. 96–100.

27. Bremerstein T., Potthoff A., Michaelis A., Schmiedel C., Uhlmann E., Blug B., et al. Wear of abrasive media

and its effect on abrasive flow machining results //Wear. 2015. Vol. 342–343. P. 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.013>

References

1. Zaman HA, Sharif S, Dong-Won Kim, Idris MH, Suhaimi MA, Tumurkhuyag Z. Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys – A Review. *Procedia Manufacturing*. 2017;11:563–570. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.150>
2. Kishawy HA, Hosseini A. Machining Difficult-to-Cut Materials. *Materials Forming, Machining and Tribology*. 2018;97–137. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-95966-5_4 https://doi.org/10.1007/978-3-319-95966-5_4 [Accessed 12th January 2019].
3. Ulutan D, Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011;51(3):250–280. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003>
4. Muralova K, Benes L, Prokes T, Zahradnicek R, Bednar J, Otoupalik J, et al. Micro-milling machinability of pure molybdenum. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;102:4153–4165. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03524-5>
5. Sortino M, Totis G, Prosperi F. Dry turning of sintered molybdenum. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013;213(7):1179–1190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.017>
6. Promptov AI. Features of chip formation under molybdenum alloy cutting. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2012;2:32–36. (In Russ.)
7. Levko VA, Simakova AE, Savin DI. The efficiency improving of abrasive flow machining on managing of the life cycle factors of media. *Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologii* = Siberian Journal of Science and Technology. 2017;18(4):932–938. (In Russ.)
8. Mohammadian N, Turenne S, Brailovski V. Surface finish control of additively manufactured Inconel 625 components using combined chemical-abrasive flow polishing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;252:728–738. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.020>
9. McCarty RW. *Method of honing by extruding*. Patent U.S., no. 3521412; 1970.
10. Gorana VK, Jain VK, Lal GK. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004;44(2–3):201–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.10.004>
11. Gorana VK, Jain VK, Lal GK. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining. *Wear*. 2006;260(1–2):128–139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.038>
12. Petare AC, Jain NK. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97(1):741–782. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>
13. Kumar SS, Hiremath SS. A Review on Abrasive Flow Machining (AFM). *Procedia Technology*. 2016;25:1297–1304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.224>
14. Wei Haibo, Peng Can, Gao Hang, Xuanping, Xuyue Wang. On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasive flow machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019;138:66–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.12.003>
15. Zhang Ke Hua, Ding Jin Fu, Xu Yong Chao. Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM). *Advanced Materials Research*. 2013;797:390–395. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.797.390>
16. Nosenko VA, Avilov AV, Ladygina OM, Kuznetsov SP. Corund surface after interaction with molybden in conditions of microscarring on speed 60 m/s. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* = Modern high technologies. 2017;10:39–44. (In Russ.)
17. Levko VA. Contact processes under abrasive flow machining processes. *Metalloobrabotka* = Metalworking. 2008;3:19–23. (In Russ.)
18. Uhlmann E, Schmiedel C, Wendler J. CFD Simulation of the Abrasive Flow Machining Process. *Procedia CIRP*. 2015;31:209–214. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.091>
19. 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;101(2):39–54. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2914-9>
20. Zhu Li Feng, Wang Kai, Wu Huan, Xiu Dong, Sun Li Zhong. Research on the Methods for Common-Rail Pipe Holes Abrasive Flow Machining. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;721:122–126. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.721.122>
21. Wu Ming Yu, Gao Hang. The Research of Extruded Pressure Auto-Adjustment Method in Abrasive Flow Polishing. *Advanced Materials Research*. 2014;1027:203–207. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1027.203>
22. Dash R, Maity K. Simulation of abrasive flow machining process for 2D and 3D mixture models. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2015;10:424–432. <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0366-6>
23. Xiu Tian-Xun, Wang Wei, Liu Kun, Wang Zhi-Yong, Wei Dao-Zhu. Characteristics of force chains in friction-

al interface during abrasive flow machining based on discrete element method. *Advances in Manufacturing*. 2018;6:355–375. <https://doi.org/10.1007/s40436-018-0236-7>

24. Levko VA, Lubnin MA, Snetkov PA, Pshenko EV, Turilov DM. Research on the influence of the canal finishing shape on the flow in media for abrasive flow machining processes. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* = *Vestnik of SibGAU*. 2009;4:138–145. (In Russ.)

25. Levko VA. A model of working medium flow during abrasive-extrusion processing of thin axisymmetric channels of long length. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* = I. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University Bulletin. Series: Mechanics of the Ultimate State. 2008;2:85–94. (In Russ.)

26. Levko VA. Rheology features under abrasive-extrusion processing. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* = *Vestnik of SibGAU*. 2005;7:96–100. (In Russ.)

27. Bremerstein T, Potthoff A, Michaelis A, Schmiedel C, Uhlmann E, Blug B, et al. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results. *Wear*. 2015;342–343:44–51. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.013>

Критерии авторства

Левко В.А., Савин Д.И., Литовка О.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Levko V.A., Savin D.I., Litovka O.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Левко Валерий Анатольевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Сибирский государственный университет науки
и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева,
660037, г. Красноярск, пр. газеты Красноярский
рабочий, 31, Россия;
✉ e-mail: levko@sibsau.ru

Valery A. Levko,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering
Technology,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk 660037,
Russia
✉ e-mail: levko@sibsau.ru

Савин Дмитрий Игоревич,
аспирант,
Сибирский государственный университет науки
и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева,
660037, г. Красноярск, пр. газеты Красноярский
рабочий, 31, Россия;
e-mail: 3608318@mail.ru

Dmitry I. Savin,
Postgraduate Student,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk 660037,
Russia
e-mail: 3608318@mail.ru

Литовка Ольга Владимировна
аспирант,
Сибирский государственный университет науки
и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева,
660037, г. Красноярск, пр. газеты Красноярский
рабочий, 31, Россия;
e-mail: litovka.9518@gmail.com

Olga V. Litovka,
Postgraduate Student,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk 660037,
Russia
e-mail: litovka.9518@gmail.com