

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ФАКТОРАМИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

В. А. Левко*, А. Е. Симакова, Д. И. Савин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: levko@sibsau.ru

Предложен подход, при котором для каждой стадии жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком определяется набор факторов и функций отклика. На следующей стадии жизненного цикла функции отклика предыдущей стадии становятся факторами (исходными данными).

Анализ публикаций показал, что в них отсутствует систематизированное описание факторов технологического процесса обработки абразивным потоком на разных стадиях жизненного цикла.

Предпринята попытка систематизировать переменные данной технологии и установить их взаимосвязь через этапы жизненного цикла рабочей среды как инструмента финишной обработки.

Приведено описание жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком. Жизненный цикл включает в себя пять стадий, разделенных на тринадцать этапов. На основе анализа мирового опыта для каждого этапа предложен набор факторов, позволяющих дать характеристику обрабатываемой детали, рабочей среды, режимов обработки, а также контактных взаимодействий между абразивным зерном и обрабатываемой поверхностью.

Авторы сделали описание особенностей стадии изготовления жизненного цикла рабочей среды, в котором раскрываются особенности технологии ее изготовления.

Описанный подход позволяет повысить эффективность обработки абразивным потоком за счет снижения затрат на подготовку производства и эксплуатацию рабочей среды. Этот факт особенно важен для производства ракетно-космической техники, характеризующейся широкой номенклатурой деталей с различными видами поверхностей, которые требуют операции финишной обработки.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, рабочая среда, жизненный цикл, фактор, эффективность обработки.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 932–938

THE EFFICIENCY IMPROVING OF ABRASIVE FLOW MACHINING ON MANAGING OF THE LIFE CYCLE FACTORS OF MEDIA

V. A. Levko*, A. E. Simakova, D. I. Savin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: levko@sibsau.ru

The article proposes the approach in which a set of factors and response functions is determined for each stage of the life cycle of the working medium for abrasive flow machining treatment. The response functions in turn in the next stage become factors (initial data). The analysis of publications has shown that in the literature there is no systematized description of the factors of the technological process of abrasive flow machining at different stages of the life cycle.

An attempt is made to systematize the variables of this technology and to establish their interrelation through the stages of the life cycle of the working media as a finishing tool.

The authors describe the life cycle of the working medium for abrasive flow machining. The life cycle includes five stages, divided into thirteen stages. On the basis of the analysis of the world experience, a set of factors is proposed for each stage enabling to give a characteristic of the workpiece, working medium, processing modes, as well as contact interactions between the abrasive grain and the surface to be finished.

The authors made a description of the peculiarities of the stage of manufacturing the stage of the experimental batch of the life cycle of the working environment, in which features of the technology of its production are disclosed.

The approach described in the article makes it possible to improve the efficiency of abrasive flow machining by reducing the costs of preparing the production and operating the working media. This fact is especially important for the production of rocket and space technology, characterized by a wide range of parts with different types of surfaces that require finishing operations.

Keywords: abrasive flow machining, media, life cycle, factor, improving the efficiency.

Введение. Производство ракетно-космической техники характеризуется наличием широкой номенклатуры деталей со сложными поверхностями. В ряде случаев формообразование и обеспечение качества изготовления таких поверхностей возможно только специальными методами литья или электроэрозионной обработкой с последующей финишной обработкой.

Выбор вида финишной обработки имеет большое значение, так как полученные вышеперечисленными методами поверхности имеют дефектный слой, характеризующийся высоким уровнем остаточных напряжений, деформационного упрочнения (наклепа) и неровностей поверхности, что снижает их надежность и работоспособность, сопротивление усталости и прочность.

Мировая практика производства ракетно-космической техники показывает, что одной из наиболее трудоемких, неконтролируемых областей в изготовлении сложных, прецизионных деталей являются заключительные операции чистой обработки. Их доля может достигать до 15 % от общего объема затрат на производство [1].

Это обусловлено тем, что финишная обработка сложных поверхностей традиционными способами обработки практически не применяется из-за затрудненного доступа инструмента к обрабатываемой поверхности. Для этих целей все большее применение получают нетрадиционные методы финишной обработки, в которых в качестве инструмента применяется поток разнообразных жидкостных или уплотненных сред, несущих рабочие элементы, которые при перемещении вдоль обрабатываемой поверхности вступают в контакт с ее неровностями.

Одним из представителей нетрадиционных методов финишной обработки является обработка абразивным потоком (abrasive flow machining), которая в России имеет названия абразивно-экструзионной обработки или экструзионного хонингования. Отмечено, что внедрение в широкое промышленное производство этой технологии сдерживается отсутствием систематизированных теоретических основ процесса, что не дает возможности оценить границы применимости способа с научной точки зрения [2].

За последние годы появился ряд работ, посвященных исследованиям различных аспектов этого метода. Так, дано описание расчета сил, возникающих при деформации материала при обработке абразивным потоком [3]. Приведены результаты исследования влияния геометрических параметров абразивных зерен при обработке абразивным потоком [4], а также параметров процесса, влияющих на силы резания при обработке абразивным потоком [5]. Дана характеристика контактным процессам при абразивно-экструзионной обработке [6], а также на основе модели контактных взаимодействий предложен метод расчета шероховатости поверхности [7]. Приведен обзор современного состояния и применения процессов отделки абразивным потоком в англоязычной литературе [8], а также обзор экспериментальных исследований с использованием вариантов обработки абразивным потоком и сред [9].

Была предложена методика оценки точности, качества и эффективности абразивно-экструзионной

обработки деталей [10]. Эта методика включает в себя шесть этапов и позволяет сократить объем и сроки экспериментальных исследований при разработке оптимальных режимов обработки абразивным потоком новых деталей.

Предложен промышленно осуществимый подход к оптимизации процессов обработки абразивным потоком и перспективы реализации, позволяющие значительно улучшить точность и эффективность процесса [11]. Этот подход может быть использован для оптимизации конструкции установки для обработки и новых методов закрепления заготовки при обработке. Подход включает в себя восемь этапов. Первые два этапа, исходя из шероховатости поверхности и формы обрабатываемого канала, позволяют осуществить выбор режимов обработки и состава рабочей среды (потока). Эти данные, наряду с требуемым результатом обработки (описывается на третьем этапе), помогают сформулировать на четвертом этапе целевые показатели потока: скорость, температуру, объем и состав. На пятом этапе эти данные используются для расчета режима течения по уравнениям Бернулли и Хагена-Пуазейля. Там же для потока среды определяется число Рейнольдса. На шестом этапе определяют перепад давлений и реальную скорость потока, а также характер потока. На седьмом этапе моделируются параметры обработки и свойства среды, а также определяется геометрия приспособления для закрепления детали. На восьмом этапе происходит окончательное моделирование процесса [11].

Обработка абразивным потоком является сложным процессом, характеризующимся целым рядом физических явлений. Число переменных, с разной степенью влияющих на эффективность процесса обработки, велико. Для успешного внедрения технологии обработки абразивным потоком в производство по предложенным методикам потребуется участие специалистов в этой области.

Анализ публикаций показал, что в обзорах нет систематизированного описания факторов технологического процесса обработки абразивным потоком на его разных этапах. Например, нет данных о переменных, влияющих на стойкость рабочей среды, сроки ее хранения, способы изготовления и утилизации.

В работе предпринята попытка систематизировать переменные данной технологии и установить их взаимосвязь через этапы жизненного цикла рабочей среды как инструмента финишной обработки. Такой подход позволит выработать рекомендации по выбору факторов на каждой стадии жизненного цикла и повысить эффективность обработки абразивным потоком.

Жизненный цикл рабочей среды. Жизненный цикл изделия, жизненный цикл (life cycle) – это совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от ее замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации [12].

Для жизненного цикла инструментов, применяемых в металлообработке, принято выделять четыре стадии. На стадии разработки (development) выполняются проектирование конструкции изделия, изготовление

и испытания опытных образцов, технологическая подготовка производства. На стадии производства (manufacturing) осуществляется изготовление изделий, предназначенных для поставки заказчиком (серийных изделий). На стадии эксплуатации (operation) реализуется, поддерживается и восстанавливается качество изделия. Эта стадия включает в общем случае использование по назначению, транспортирование и техническую эксплуатацию: хранение, техническое обслуживание и все виды ремонта, кроме тех, которые выполняются на условиях временного вывода изделия из эксплуатации, например, капитальный ремонт. На стадии утилизации (disposal) осуществляется изменение целевого назначения или уничтожение изделий по причине невозможности или нецелесообразности их дальнейшего применения по основному назначению с обеспечением возможности вторичного использования таких изделий либо материалов, полученных при их уничтожении (разборке) [12].

Данный подход был использован с целью описания стадий жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком (табл. 1).

На каждой стадии жизненного цикла изделия формируются информационные потоки, которые обеспечивают систему управления исходными данными (факторами) и целевыми установками (функциями отклика).

Повышение эффективности обработки абразивным потоком возможно за счет управления факторами стадий жизненного цикла рабочей среды. Для каждой стадии жизненного цикла определяется набор факторов и функций отклика. На следующей стадии функции отклика предыдущей стадии становятся факторами (исходными данными).

Выделение в жизненном цикле инструмента стадии разработки предусматривает формирование уровня, соответствующего современным достижениям науки и производственного опыта, прогнозу потребностей промышленности на период производства рабочей среды, а также подготовку комплекта технической и нормативной документации для изготовления,

обращения и эксплуатации инструмента при установленных экономических показателях. Достижение целей на каждой стадии предусматривается при максимальной эффективности. Необходимо обеспечить выполнение технического задания при заданной степени надежности инструмента и минимизации материальных и временных затрат. Понятие эффективности включает в себя снижение себестоимости и сроков изготовления рабочей среды, а также сроков внедрения в производство конкретных деталей.

Разработке этой стадии жизненного цикла посвящено большинство публикаций. Первоначально при создании рабочей среды для обработки абразивным потоком учитывались такие факторы, как зернистость и весовое содержание абразивного наполнителя среды, объем и температура среды, сдвигающее давление в рабочих цилиндрах установки. Эти факторы, соответственно, определяли эффективную вязкость среды и скорость потока среды [13]. Используя эти значения как факторы на следующей стадии жизненного цикла, экспериментально определялись зависимости шероховатости обработанной поверхности и величины удаляемого материала в единицу времени. При этом учитывалось влияние на процесс обработки таких переменных, как твердость и обрабатываемость материала, а также исходная шероховатость обрабатываемой поверхности.

Далее были проведены исследования влияния таких факторов, как L – длина обрабатываемого капилляра, P – давление внутри потока, Q – объемный расход среды, r – радиус обрабатываемого капилляра, t – время обработки, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига потока среды, η – вязкость среды, τ – напряжение сдвига среды [14]. В данной работе впервые рабочая среда исследовалась с применением капиллярного реометра. Это позволило установить ряд качественных зависимостей. Например, увеличение вязкости рабочей среды приводит к увеличению перепада давлений на входе и выходе обрабатываемого канала. Зернистость наполнителя несущественно влияет на вязкость среды, а температура – наоборот.

Таблица 1

Описание жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком

Жизненный цикл рабочей среды		Методы получения исходных данных
Стадия	Этап	
Разработка (исследование и проектирование)	Начальный	Теоретические и лабораторные исследования
	Предпроектный	
	Проектный	
	Заключительный	
Изготовление	Опытная партия	Предложения и замечания изготовителя (производственные испытания)
	Установочная серия	Определение себестоимости изготовления (производственные наблюдения)
	Серийное и/или массовое производство	Анализ учетной документации и отбраковка
Эксплуатация	Внедрение на отдельном рабочем месте	Производственные испытания
	Внедрение на отдельной операции	Производственные наблюдения
	Массовая эксплуатация	Анализ учетной документации и отбраковка
Утилизация	Сбор и сортировка отходов	Анализ учетной документации и переработка отходов
	Переработка отходов	
Интегральная оценка качества инструмента		Анализ учетной информации по всем стадиям жизненного цикла

Для исследования тепловых свойств рабочей среды, представляющей собой смесь полиборосилоксана и абразива карбида кремния, было предложено увеличить число факторов. Были добавлены такие факторы, как C_p – удельная теплоемкость (Дж/кг · К), D – диаметр экспериментальной установки (м), h – коэффициент поверхностной теплопередачи (Вт/м² · К), L, l – длина цилиндра (экспериментальной установки) (м), \dot{q} – поток тепловой энергии (Вт), S – фактор (коэффициент) формы, v – объемная фракция (доля) (безразмерный), λ – теплопроводность (Вт/м · К) [15].

При моделировании обработки абразивным потоком с использованием нейронной сети [16] перечень был дополнен таким фактором, как состояние рабочей среды (режущая способность, уровень загрязнения). Важным дополнением в моделировании процесса стало предложение учитывать влияние формы обрабатываемого канала: круглая, щелевая, постоянная, переменная, профильная и др. [17].

Для моделирования поверхности, создаваемой в процессе обработки абразивным потоком, были предложены обозначения факторов, которые для обработки абразивным потоком стали общепринятыми [3; 18; 19]. Эти факторы можно распределить по группам.

Для описания обрабатываемой детали применимы такие факторы, как b – размер поперечного сечения (м), H_w – твердость материала обрабатываемой детали (МПа), l_w и r_w – длина и радиус обрабатываемого канала (м), E_m – модуль упругости материала заготовки (кг/мм²), R_a^o и R_a – начальная и конечная шероховатость поверхности (мм), a – угол между нормалью к входному сечению заготовки и ее центральной осью.

Для описания рабочей среды применимы такие факторы, как C – процентное содержание абразива в среде по весу, d_g и r_g – диаметр и радиус абразивного зерна (м), M – зернистость (дисперсность) абразивного зерна, V_a – объем абразива (м³), ρ_a – плотность абразива (кг/м³), ρ_c – плотность носителя (полимерной основы среды) (кг/м³), ρ_m – плотность среды (в целом) (кг/м³), σ_r – стандартное распределение радиусов абразивных зерен, η_a – кажущаяся вязкость рабочей среды (Па · с), σ – одноосное напряжение (Па · с), η_0 – нулевое значение η_a , σ_0 – начальное напряжение потока материала (кг/мм²).

Для описания режимов обработки применимы такие факторы, как T – время обработки (с), N – количество циклов обработки, n – номер цикла обработки, p – давление сдвига (экструзии) (МПа), p_n – воздействие давления на абразивные зерна по нормали (МПа), r_c – радиус рабочих цилиндров установки (м), v_f – скорость течения среды в заготовке (м/с), v_p – скорость поршня или скорость потока среды на входе (в обрабатываемый канал) (м/с), v_i – компоненты вектора скорости, V – общий объем удаленного материала (м³), V_i – объем материала, удаленного на i -м цикле (м³).

Для описания контактных взаимодействий применимы такие факторы, как A – площадь контакта (мм²), μ – предполагаемый коэффициент трения между абразивным зерном и материалом заготовки, $\bar{\sigma}$ – среднее напряжение на площади контакта (кг/мм²), t – глубина вдавливания (внедрения) зерна в материал заготовки (м), C – коэффициент ограничения потока, a_i – радиус пятна контакта при внедрении зерна (м), f – средний коэффициент трения, l_s – длина контакта (м), L_i – актуальная длина контакта в i -м цикле (м), N – количество абразивных зерен, действующих на единицу площади контакта среды и заготовки (мм²), σ_r – нормальное напряжение (Н/м²), σ_{ij} – тензор напряжения, $\dot{\epsilon}_{ij}$ – тензор скорости деформации, τ_{ij} – девиаторный компонент напряжения.

Для описания сил, возникающих при контактных взаимодействиях, применимы такие факторы, как F_n – сила, направленная по нормали к абразивному зерну (Н), F – осевая сила (Н), F_{ng} – радиальная сила (Н), F_r – результирующая (суммарная) сила (Н), F'_{ng} – общая нормальная нагрузка на одно абразивное зерно (Н), F_{ap} – осевая сила, возникающая только при деформации полимерной основы среды (Н), F_{rp} – радиальная сила, возникающая только при деформации полимерной основы среды (Н), F_r – сила трения (Н), F_{rm} – измеренная радиальная сила, возникающая при воздействии рабочей среды (Н), F_{am} – измеренная радиальная сила, возникающая при воздействии рабочей среды (Н).

Начальный этап первой стадии жизненного цикла рабочей среды заключается в анализе требований рабочих чертежей детали и заготовки, приведенном в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Анализ канала детали при обработке абразивным потоком

Канал	Характеристика	Рекомендации
Тип	Внутренний	Использование приспособления для закрепления в рабочих цилиндрах
	Внешний	Использование приспособления для закрепления в рабочих цилиндрах и создания камеры обработки (формирования внешней стенки обрабатываемого канала)
Количество	Единичный	Создание условий для плавного перехода потока среды от рабочего цилиндра к входному отверстию канала
	Два и более	Создание условий для плавного перехода потока среды от рабочего цилиндра к входным отверстиям каналов и равномерного расхода среды во всех каналах
Угол между осями входного отверстия и рабочего цилиндра	Нулевой	Использование обычного приспособления
	Ненулевой	Создание условий для выравнивания потока среды на входе (направляющие аппараты)

Канал	Характеристика	Рекомендации
Отношение длины l и площади поперечного сечения b	$l \leq b$	Использование рабочих сред повышенной вязкости
	$l > b$	Использование рабочих сред повышенной и обычной вязкости
	$l \gg b$	Использование рабочих сред низкой вязкости с добавлением пластификаторов
Форма поперечного сечения	Постоянная	Использование обычного приспособления
	Переменная	Использование выравнивающих устройств

Таблица 3

Анализ поверхностного слоя детали при обработке абразивным потоком

Поверхность	Характеристика	Рекомендации
Шероховатость	Исходная	Выбор состава рабочей среды (вязкость, зернистость, тип наполнителя)
	Конечная	Определение количества циклов обработки и давления в рабочих цилиндрах
Твердость и модуль упругости материала	Термически обработанные	Выбор состава рабочей среды (высокая вязкость и зернистость), большие давления рабочих цилиндров, охлаждение среды в процессе обработки
	«Сырые»	Выбор состава рабочей среды (обычная вязкость и зернистость), средние давления рабочих цилиндров
Материал	Сплавы на основе меди и цинка	Выбор состава рабочей среды (вязкость, зернистость, тип наполнителя). Определение количества циклов обработки и давления в рабочих цилиндрах
	Алюминиевые и титановые сплавы	
	Низкоуглеродистые и углеродистые стали	
	Легированные и высоколегированные стали	
	Керамика	
	Резины, полимеры, стекла	

Предпроектный этап первой стадии жизненного цикла рабочей среды направлен на разработку плана проведения экспериментальных исследований эмпирических зависимостей режимов обработки абразивным потоком с факторами обрабатываемого канала (каналов) и его поверхностного слоя. Для разных типов деталей и материалов применяются свои подходы, но предприняты попытки предложить универсальные методики [10; 11].

В результате исследований определяется состав рабочей среды и режимы обработки. Важным показателем эффективности исследования является наличие зависимостей, связывающих такие ключевые характеристики рабочей среды, как плотность среды ρ_m и ее кажущаяся вязкость η_a , с процентным содержанием абразива в среде по весу и его зернистостью. Особое внимание уделяется составу носителя (полимерной основы), от которого во многом зависят вязкоупругие свойства потока рабочей среды. В завершение проектного этапа исследовательской стадии формируется спецификация на создание рабочей среды, которая обеспечит требуемые значения контактных взаимодействий между абразивными зёрнами потока среды и микронеровностями обрабатываемой поверхности.

Для стадии изготовления жизненного цикла рабочей среды наибольшие затраты приходится на создание опытной партии. Промышленные компании и университеты, занимающиеся изготовлением рабочих сред для обработки абразивным потоком, не раскрывают свои технологии.

Однако можно отметить, что первоначально подготавливается полимерная основа (носитель). В зависимости от требуемой вязкости подбирается тип полимера и возможные модификаторы. Для снижения

вязкости в полимер вводят различные пластификаторы. Для снижения адгезии, вызванной наличием в невулканизированных полимерах активных радикалов, в состав вводятся «ингибиторы». Например, при термомеханическом смешивании полимера с порошками фторопласта и слюды активные радикалы полимера связываются с активными элементами порошков. После определенной временной выдержки и возможного введения в состав дополнительных пластификаторов или поверхностно-активных веществ, основу рабочей среды перемешивают с абразивным наполнителем.

Обязательным условием для опытной партии является тестирование рабочей среды на ее стойкость, которая зависит от двух факторов. Основное влияние на стойкость среды оказывает постепенное накопление в ее составе частиц обрабатываемых материалов. Эти частицы становятся частью обрабатываемого инструмента. Они могут участвовать в контактных взаимодействиях с обрабатываемой деталью или частицами абразива. При определенном значении начинается процесс деструкции рабочей среды. Полимерный носитель теряет свойства закрепления единичного абразивного зерна в потоке, что негативно влияет на режущие свойства рабочей среды. Второй фактор – это нагрев рабочей среды во время обработки. С увеличением температуры среды ее вязкость уменьшается, что влияет на режимы обработки. Степень влияния нагрева на вязкость среды можно оценивать разными методами [2]. При значительном нагреве рабочей среды может наступить термическая деструкция полимерной основы.

При разработке опытной и установочных партий рабочей среды учитываются режимы технологии

обработки абразивным потоком. Эти режимы будут использоваться на следующей стадии жизненного цикла рабочей среды – стадии эксплуатации. Также учитывается радиус и объем рабочих цилиндров установки, от которых зависит объем среды, используемый для обработки.

На этой стадии уточняются такие факторы, как время обработки T и количество циклов обработки N , а также давление сдвига (экструзии) p . Давление сдвига определяет скорость поршня или скорость потока среды на входе (в обрабатываемый канал) v_p . От давления сдвига, состава рабочей среды и геометрической характеристики обрабатываемого канала зависит скорость течения среды в заготовке v_s , а также величина давления потока рабочей среды на поверхность обрабатываемого канала.

Примером успешного внедрения на отдельной операции и массовой эксплуатации можно назвать применение операции обработки абразивным потоком для финишной обработки профилирующих матриц в металлургическом производстве.

Стадия утилизации рабочей среды заключается в сборе остатков рабочей среды с последующей сортировкой. Особое внимание уделяется рабочим средам, которые участвовали в обработке ценных материалов. В этом случае остатки подвергаются химической или термохимической деструкции с последующим сепарированием отходов и разделением фракций абразивных зерен и микрочастиц ценных материалов. Случаи повторного использования рабочих сред для обработки абразивным потоком литературно не зафиксированы.

Интегральная оценка качества рабочей среды как инструмента для обработки абразивным потоком позволяет внести корректировки в существующие зависимости, связывающие факторы различных стадий жизненного цикла рабочей среды.

Описанный выше подход, при котором для каждой стадии жизненного цикла определяется набор факторов и функций отклика, которые, в свою очередь, на следующей стадии становятся факторами, позволяет повысить эффективность обработки абразивным потоком за счет снижения затрат на подготовку производства и эксплуатацию рабочей среды.

Этот факт особенно важен для производства ракетно-космической техники, характеризующейся широкой номенклатурой деталей с различными видами поверхностей, которые требуют операции финишной обработки.

Заключение. В статье предложен подход, при котором для каждой стадии жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком определяется набор факторов и функций отклика. На следующей стадии жизненного цикла функции отклика предыдущей стадии становятся факторами (исходными данными).

Анализ публикаций показал, что в них отсутствует систематизированное описание факторов технологического процесса обработки абразивным потоком на разных стадиях жизненного цикла.

В работе предпринята попытка систематизировать переменные данной технологии и установить их взаимосвязь через этапы жизненного цикла рабочей среды как инструмента финишной обработки.

Приведено описание жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком. Жизненный цикл включает в себя пять стадий, разделенных на тринадцать этапов. На основе анализа мирового опыта для каждого этапа предложен набор факторов, позволяющих дать характеристику обрабатываемой детали, рабочей среды, режимов обработки, а также контактных взаимодействий между абразивным зерном и обрабатываемой поверхностью.

Описанный в статье подход позволяет повысить эффективность обработки абразивным потоком за счет снижения затрат на подготовку производства и эксплуатацию рабочей среды, что особенно важно для производства ракетно-космической техники.

Библиографические ссылки

1. Larry Rhoades. Abrasive flow machining a case study // *Journal of Materials Processing Technology*. 1991. Vol. 28, iss. 1–2. P. 107–116.
2. Левко В. А. Абразивно-экструзионная обработка. Современный уровень и теоретические основы процесса : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007.
3. Gorana V. K., Jain V. K., Lal G. K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining // *Wear*. 2006. Vol. 260, iss. 1–2. P. 128–139.
4. Zhong Ming Xu, Yong Wu Luo. Study on the Influence of Geometrical Parameters of Abrasive Grains in Abrasive Flow Machining // *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 135. P. 52–57.
5. Ke Hua Zhang, Jin Fu Ding, Yong Chao Xu. Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM) // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 797. P. 390–395.
6. Левко В. А. Контактные процессы при абразивно-экструзионной обработке // *Металлообработка*. 2008. № 3. С. 19–23.
7. Levko V. A. Calculation of surface roughness in abrasive-extrusion machining on the basis of contact-interaction model // *Russian Aeronautics*. 2009. Vol. 52, № 1. С. 94–98.
8. Mali H. S., Manna A. Current status and application of abrasive flow finishing processes : A review // *Journals Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture*. 2009. Vol. 223. P. 809–820.
9. Developments in abrasive flow machining: a review on experimental investigations using abrasive flow machining variants and media / M. S. Cheema [et al.] // *Journals Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture*. 2012. Vol. 226, iss. 12. P. 1951–1962.
10. Методика оценки точности, качества и эффективности абразивно-экструзионной обработки деталей / В. А. Левко [и др.] // *Вестник СибГАУ*. 2011. № 4 (37). С. 173–178.
11. Mitchell Howard, Kai Cheng. An industrially feasible approach to process optimisation of abrasive flow machining and its implementation perspectives // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture*. 2013. Vol. 227. № 11. P. 1748–1752.

12. ГОСТ Р 56136–2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения.

13. Pat. 3634973 US. Apparatus for abrading by extrusion and abrading medium / McCarty R. W. 27.08.1969 ; 18.01.1972. Vol. 894. № 3.

14. Davies P. J., Fletcher A. J. The Assessment of the Rheological Characteristics of Various Polyborosiloxane/Grit Mixtures as Utilized in the Abrasive Flow Machining Process // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C. Journal of Mechanical Engineering Science. 1995. Vol. 209. P. 409–418.

15. Fletcher A. J., Fioravanti A. Polishing and Honing Processes: An Investigation of the Thermal Properties of Mixtures of Polyborosiloxane and Silicon Carbide Abrasive // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C. Journal of Mechanical Engineering Science. 1996. Vol. 210. P. 255–265.

16. Smith A. E., Slaughter W. S. Neural Network Modeling of Abrasive Flow Machining // Proceedings of the Advanced Technology Program Motor Vehicle Manufacturing Technology Public Workshop. NIST Document NISTIR 6079. Ann Arbor, MI, 1997. P. 151–158.

17. Petri K., Billo R., Bidanda B. A neural network process model for abrasive flow machining operations // Journal of Manufacturing Systems. 1998. Vol. 17, iss. 1. P. 52–64.

18. Jain R. K., Jain V. K. Simulation of surface generated in abrasive flow machining process // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 1999. Vol. 15, iss. 5. P. 403–412.

19. Jain R. K., Jain V. K., Dixit P. M. Modeling of material removal and surface roughness in abrasive flow machining process // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1999. Vol. 39, iss. 12. P. 1903–1923.

References

1. Larry Rhoades. Abrasive flow machining a case study. *Journal of Materials Processing Technology*. 1991, Vol. 28, Iss. 1–2, P. 107–116.

2. Levko V. A. *Abrazivno-ekstruzionnaya obrabotka. Sovremennyy uroven' i teoreticheskie osnovy protsessa: monografiya* [Abrasive flow machining. Modern level and theoretical bases of the process: monograph]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2007.

3. Gorana V. K., Jain V. K., Lal G. K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining. *Wear*. 2006, Vol. 260, Iss. 1–2, P. 128–139.

4. Zhong Ming Xu, Yong Wu Luo. Study on the Influence of Geometrical Parameters of Abrasive Grains in Abrasive Flow Machining. *Advanced Materials Research*. 2010, Vol. 135, P. 52–57.

5. Ke Hua Zhang, Jin Fu Ding, Yong Chao Xu. Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM). *Advanced Materials Research*. 2013, Vol. 797, P. 390–395.

6. Levko V. A. [Contact processes in abrasive flow machining]. *Metalloobrabotka*. 2008, No. 3, P. 19–23 (In Russ.).

7. Levko V. A. Calculation of surface roughness in abrasive-extrusion machining on the basis of contact-

interaction model. *Russian Aeronautics*. 2009, Vol. 52, No. 1, P. 94–98.

8. Current status and application of abrasive flow finishing processes: A review / H. S. Mali, A. Manna. *Journals Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2009, Vol. 223, P. 809–820.

9. Cheema M. S., Venkatesh G., Dvivedi A., Sharma A. K. Developments in abrasive flow machining: a review on experimental investigations using abrasive flow machining variants and media. *Journals Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012, Vol. 226, No. 12, P. 1951–1962.

10. Levko V. A., Lubnin M. A., Sysoev S. K., Sysoev A. S., Sysoeva L. P. [Method for assessing the accuracy, quality and efficiency of abrasive flow machining of parts]. *Vestnik SibGAU*. 2011, No. 4 (37), P. 173–178 (In Russ.).

11. Mitchell Howard, Kai Cheng. An industrially feasible approach to process optimisation of abrasive flow machining and its implementation perspectives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2013, Vol. 227, No. 11, P. 1748–1752.

12. GOST R 56136–2014. Life-cycle management of military products. Terms and Definitions.

13. Pat. 3634973 US, Apparatus for abrading by extrusion and abrading medium / McCarty R. W. 27.08.1969; 18.01.1972, Vol. 894, No. 3.

14. Davies P. J., Fletcher A. J. The Assessment of the Rheological Characteristics of Various Polyborosiloxane/Grit Mixtures as Utilized in the Abrasive Flow Machining Process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 1995, Vol. 209, P. 409–418.

15. Fletcher A. J., Fioravanti A. Polishing and Honing Processes: An Investigation of the Thermal Properties of Mixtures of Polyborosiloxane and Silicon Carbide Abrasive. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 1996, Vol. 210, P. 255–265.

16. Smith A. E., Slaughter W. S. Neural Network Modeling of Abrasive Flow Machining. *Proceedings of the Advanced Technology Program Motor Vehicle Manufacturing Technology Public Workshop*. NIST Document NISTIR 6079, Ann Arbor, MI, October 1997, P. 151–158.

17. Petri K., Billo R., Bidanda B. A neural network process model for abrasive flow machining operations. *Journal of Manufacturing Systems*. 1998, Vol. 17, Iss. 1, P. 52–64.

18. Jain R. K., Jain V. K. Simulation of surface generated in abrasive flow machining process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 1999, Vol. 15, Iss. 5, P. 403–412.

19. Jain R. K., Jain V. K., Dixit P. M. Modeling of material removal and surface roughness in abrasive flow machining process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1999, Vol. 39, Iss. 12, P. 1903–1923.