

пользуют мазеообразные 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.

#### Библиографические ссылки

1. Левко В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 7. С. 96–100.
2. Левко В. А., Пшенко Е. Б. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-

экструзионной обработки сложнопрофильных деталей // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 11. С. 64–68.

3. Левко В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины // Вестник Чебоксар. гос. пед. ун-та. Механика предельного состояния : сб. науч. тр. / под ред. акад. Д. И. Ивлева ; Чувашск. гос. педаг. ун-т. Чебоксары, 2008. № 2. С. 85–94.

4. Левко В. А. Расчет шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий // Авиационная техника. Известия вузов / под ред. проф. В. А. Фирсова ; Казан. гос. техн. ун-т. 2009. № 1. С. 59–62.

5. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко [и др.] // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 138–145.

V. A. Levko, A. A. Levko

### RESEARCH OF ABRASIVE EXTRUSION-TYPE PROCESSING OF SMALL HOLES

*The research of flow of operating environment of holes with small cross-sectional area were performed. A new composition of the working media, filled with diamond paste, was developed. The experimental processing of a gear wreath revealed the applicability of the new operating environment for the processing of holes with small cross-sectional area.*

*Keywords: abrasive extrusion-type processing, annular gap, medium, cross-sectional area, leveling device.*

© Левко В. А., Левко А. А., 2011

УДК 621.924

В. А. Левко, М. А. Лубнин, С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, Л. П. Сысоева

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ, КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ АБРАЗивно-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ\*

*Разработана методика, позволяющая существенно сократить затраты на проведение исследований. Описаны все этапы оценки точности, качества и эффективности обработки.*

*Ключевые слова: абразивно-экструзионная обработка, кольцевая щель, рабочая среда, площадь поперечного сечения, выравнивающее устройство.*

Лабораторией отделочных методов СибГАУ совместно со специалистами ОАО «Красмаш» проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований процесса абразивно-экструзионной обработки (АЭО), направленных на разработку теоретических основ расчета точности, качества и эффективности АЭО при изготовлении конкретных деталей. Результатом этой работы является расчетная методика, позволяющая оптимизировать затраты на технологическую подготовку производства при использова-

нии метода АЭО. Методика включает в себя шесть этапов.

На первом этапе осуществляется выбор гидродинамической модели для предварительного расчета расходно-напорных характеристик потока рабочей среды в зависимости от геометрических характеристик и площади обрабатываемой поверхности деталей с последующей коррекцией расчета с учетом влияния возникающих в потоке касательных и нормальных напряжений.

\*Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные, научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». (грант № П 11 21).

На втором этапе реализуется выбор требуемого состава рабочей среды как абразивного инструмента по предложенным зависимостям вязкоупругих свойств с учетом величины сдвигающих напряжений в рабочем цилиндре установки.

На третьем этапе проводятся расчеты фактической площади контакта, величины и направления сил, возникающих при контакте, а также размерности сближения (величину съема материала) при единичном контакте в зависимости от величины и вида абразивного зерна, степени наполнения рабочей среды, характеристик потока, состояния поверхностного слоя обрабатываемой детали и ее физико-механических свойств в базовом канале.

На четвертом этапе ведется расчет шероховатости обработанной поверхности и производительности обработки выбранной среды в базовом канале на основе контактной модели.

На пятом этапе производится перерасчет шероховатости поверхности и производительности обработки в исследуемом канале с учетом расходно-напорных характеристик потока.

На шестом этапе осуществляется верификация расчетов при помощи моделирования процесса АЭО, а также экспериментальная отработка технологии на образцах с использованием опытно-промышленного оборудования.

Разработка начинается с анализа конструктивных особенностей обрабатываемой детали. Последовательность анализа следующая: выбирается тип обрабатываемой поверхности – внутренняя или наружная; при обработке наружных поверхностей деталь должна помещаться в приспособление, внутренняя поверхность которого образовывала с ней канал, по которому будет продавливаться среда.

Определяется общее количество проточных каналов в обрабатываемой детали: один или более. Во втором случае, в конструкции приспособления предусматриваются полости для переформирования профиля потока рабочей среды. Как правило, для лопастных деталей характерно, что все каналы идентичны друг другу. Это позволяет проводить полный геометрический анализ на одном канале.

Для этого устанавливаются геометрические характеристики обрабатываемого канала: длина  $L_k$ , площадь и периметр поперечного сечения  $S_{сеч}$ , площадь минимального поперечного сечения канала  $S_{min}$ , суммарная площадь обрабатываемой поверхности  $S_{обр}$ , форма, размер и угол входного  $Z_{вх}$  и выходного  $Z_{вых}$  отверстия канала. Поперечное сечение канала может быть постоянной и переменной формы  $S_{сеч} \neq const$ .

Длина обрабатываемого канала  $L_k$  определяет диапазон величин сдвигающих давлений среды на входе  $P_{вх}$  и выходе  $P_{вых}$  из канала. Отношение  $L_k / S_{сеч}$  и  $S_{обр} / S_{сеч}$  влияет на выбор коэффициента эффективной вязкости  $\eta$  среды. При больших значе-

ниях данных показателей применяются среды с пониженной вязкостью и наоборот. Если не учитывать данного обстоятельства, то возможно заклинивание среды большой вязкости в канале большой длины или значительное увеличение машинного времени при использовании сред низкой вязкости для АЭО каналов с малым значением коэффициентов  $L_k / S_{сеч}$  и  $S_{обр} / S_{сеч}$ .

Далее, с учетом материала детали, производится оценка исходного состояния поверхностного слоя обрабатываемого канала: параметры шероховатости  $Ra$  или  $Rz$ ,  $R_{max}$ ,  $Sm$ ; параметры волнистости  $Wa$  или  $Wz$ ,  $W_{max}$ ; параметры наклепа степень  $u_n$ , глубина  $h_n$  и градиент  $u_{гр}$

$$u_n = \frac{H\mu_{max} - H\mu_{исх}}{H\mu_{исх}} 100, \quad u_{гр} = \frac{H\mu_{max} - H\mu_{исх}}{h_n},$$

где  $H\mu_{max}$  – максимальная поверхностная микротвердость;  $H\mu_{исх}$  – исходная микротвердость материала.

Результаты анализа исходного состояния сравниваются с требованиями к поверхностному слою, указанными в конструкторской документации. Устанавливается приближенная величина минимального припуска на обработку.

Из созданного нами перечня выбирается состав рабочей среды: материал абразивного зерна и степень дисперсности  $Вa$ , а также процентное содержание  $Ка$  наполнителя в среде по массе. Перечень построен на соответствии вязкоупругих свойств среды с обрабатываемостью материала и величиной дефектного слоя.

Если в перечне необходимая информация отсутствует, определение вязкоупругих свойств рабочей среды проводится по методикам [1]. При установлении коэффициента эффективной вязкости геометрические характеристики приспособления устанавливают из подобия площади поперечного сечения и всей площади внутренней поверхности обрабатываемого канала.

Характер течения рабочей среды в каналах обрабатываемой детали в качестве абразивного инструмента зависит от их конфигурации, геометрических размеров и формы поперечного сечения.

При выборе гидродинамической модели проводится анализ зон течения рабочей среды в обрабатываемых каналах. При АЭО внутреннего канала, имеющего подобную конфигурацию входного и выходного отверстий, анализ проводят следующим образом.

Для двунаправленной схемы АЭО деталей, имеющих подобную конфигурацию входного и выходного отверстий, можно выделить три основные зоны течения (рис. 1). Зона рабочих цилиндров 1 представляет собой круглый канал постоянного сечения, в котором поршень, выступая в роли передвижной стенки, выдавливает РС через зону 2 переходников сквозь обрабатываемую деталь 3. Переходники 2 позволяют сформировать на входе в канал обрабатываемой детали 3 необходимый профиль потока РС. Перестройка

профиля происходит от кругового сечения рабочего цилиндра до профиля входного отверстия канала детали 3.

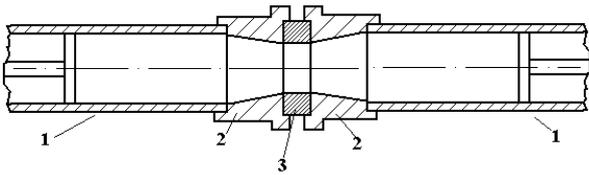


Рис. 1. Зоны течения при двенаправленной АЭО

Поэтому внутренний канал переходников имеет переменную форму поперечного сечения. Форма сечения такого канала плавно меняется от окружности на входном отверстии до формы входного отверстия канала детали 3. Если форма этого отверстия имеет сложный профиль, то обычно профиль сопрягаемого выходного отверстия переходника 2 упрощается до окружности, в которую вписывается профильное входное отверстие детали 3. Зону 2 можно отнести к течению в диффузоре, кольцевом зазоре или плоской щели. Если обрабатывается деталь, у которой количество входных и выходных отверстий совпадает, но они имеют разную конфигурацию, то переходники 2 будут иметь различную форму. Для этого случая выделяется четыре зоны течения.

Для однонаправленной схемы АЭО (рис. 2) выделено четыре основные зоны течения. Зона рабочего цилиндра 1 представляет собой круглый канал постоянного сечения, в котором поршень, выступая в роли передвижной стенки, выдавливает РС через зону 2 переходников сквозь обрабатываемую деталь 3, которая крепится планкой 4.

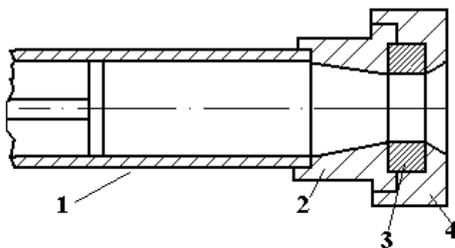


Рис. 2. Зоны течения при однонаправленной АЭО

Характер течения в зонах 1, 2, и 3 аналогичен характеру течения при двенаправленной АЭО. Зону течения 4 относят к диффузору. Эта зона течения носит вспомогательный характер. Ее основная задача – препятствовать образованию фаски на кромке выходного отверстия обрабатываемой детали.

Анализ классификации течений различных сред позволил выявить следующее. Процесс АЭО относится к классу внутренних течений в канале. Экспериментальные исследования показали [2], что плотность РС остается постоянной при широком интервале напряжений сдвига и температуры потока, т. е. это несжимаемая среда. Коэффициент динамической вязкости  $\eta$  среды при АЭО характеризует эффективную

вязкость, учитывающую вязкоупругие потери и потери потока на трение с обрабатываемым поверхностным слоем. Коэффициент  $\eta$  может изменяться в широком диапазоне, в зависимости от величины сдвигающего напряжения  $\gamma'$ , температуры  $T$  и молекулярно-массового состава среды. Информационно-технический обзор составов РС [3], а также результаты исследований [1] зависимости коэффициента эффективной вязкости РС от ее состава и величины  $\gamma'$  позволили установить, что для АЭО диапазон лежит в пределах от 1 000 Па·с до 500 000 Па·с.

Для потока среды при АЭО характерны малые числа Рейнольдса  $Re \ll 1$ . Так как для неньютоновских сред динамическая вязкость  $\eta$  является коэффициентом пропорциональности сдвигового напряжения  $\gamma'$  и градиента скорости  $du/dy$ , то  $\eta$  определяется по зависимости  $\tau = \tau_0 + \eta_0 \gamma' = \tau_0 + \eta_0 du/dy$ , а не по выражению  $\tau = \eta du/dy$ .

В связи с этим остается открытым вопрос о влиянии вязкоупругих свойств полимерной среды на характер течения в следующих зонах: в центральной зоне, в которой рабочая среда движется как несжимаемая невязкая жидкость, т. е. в «ядре потока»; течение возле обрабатываемой поверхности, которое можно отнести к несжимаемым вязким течениям в пограничном слое; течение в переходной области, описываемое моделью вязкого несжимаемого течения.

В переходной области возникают вязкие эффекты, но их величина значительно меньше, чем величина аналогичных эффектов в пограничном слое. Размер каждой зоны зависит от состава рабочей среды, конфигурации канала и величины напряжения сдвига. Далее рассмотрена применимость различных моделей потока среды для описания течения в указанных зонах.

При обработке лопастных деталей зоны течения возникают в нескольких каналах, образованных между обрабатываемой поверхностью и внутренней поверхностью приспособления (рис. 3). Зоны рабочих цилиндров имеют аналогичный характер течения, такой же как и в первом случае. Вторая зона возникает между нижней направляющей 4 и основой приспособления 5. В этой зоне происходит перестройка профиля от круглого течения к кольцевому течению или к сочетанию течений в диффузоре и кольцевом зазоре. В третьей зоне, образованной внешней поверхностью детали 3 и внутренней поверхностью крышки 2, происходит непосредственная обработка. Характер течения зависит от конфигурации обрабатываемых каналов.

После разделения на зоны течения осуществляется выбор моделей течения среды в проточных каналах. При выборе модели расчета среды проводят анализ геометрических характеристик и площади обрабатываемой поверхности деталей. Основные шаги последовательности выбора модели приведены в таблице.

Течение в зоне 1, помимо состава РС, определяется внутренним диаметром цилиндра, длиной хода штока и величиной сдвигающего давления на штоке.

Влияние состояния поверхностного слоя рабочего цилиндра на характер потока среды минимально, так как он имеет высокую твердость и шероховатость  $Ra \ll 0,16$  мкм.

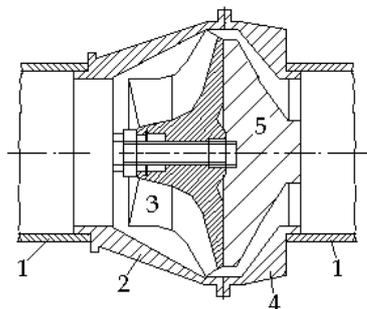


Рис. 3. Зоны течения в нескольких каналах, образованных внешней поверхностью детали и внутренней поверхностью приспособления

Течение в зоне 2 сопровождается перестройкой профиля потока от круглого в зоне 1 к требуемому в зоне 3 профилю потока. Для АЭО одноканальных деталей характер течения сводится к течению в диффузоре. При АЭО многоканальных деталей характер течения сводится к течению в кольцевом зазоре или к сочетанию течений в диффузоре и кольцевом зазоре. При проектировании геометрии канала переходника исходят из этих требований, учитывая условие минимизации площади его внутренней поверхности.

Течение в зоне 3 должно обеспечить условия для равномерной обработки всей поверхности канала до требуемой шероховатости с заданной производитель-

ностью. При этом точность обработки должна находиться в пределах заданного допуска на обработку.

Для приближенного расчета напорно-расходных характеристик для различных моделей течения в зоне 3 применяются уравнения, соответствующие типу канала. Это могут быть укороченные уравнения Навье-Стокса, точные решения гидродинамических уравнений течения в круглом прямом канале, прямоугольной и кольцевой щели.

Если зона 3 содержит несколько обрабатываемых каналов с подобными геометрическими характеристиками, то расчет ведется для одного исследуемого канала, а при анализе течения во всех зонах, скорости потока и давление среды в данных каналах принимают аналогичными скоростям и давлениям потока в исследуемом канале. Общий расход среды в зоне 3 находится как сумма расходов во всех ее каналах.

Если зона 3 содержит один канал с переменной формой сечения, то для расчета параметров потока, такой канал рассматривают как совокупность нескольких областей течения основного типа с установлением общих граничных условий на границе раздела областей течения.

В результате расчетов по модели течения получается распределение скорости и давления потока в обрабатываемом канале, а также распределение касательных напряжений рабочей среды на стенке канала. Данное решение является приближенным и дополняется расчетом распределения нормальных напряжений на стенке канала с учетом влияния абразивного наполнителя на параметры потока. Результаты расчетов являются исходными данными для моделей контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью.

#### Последовательность выбора моделей течения РС в проточных каналах

№ п/п	Шаг	Примечание
1	Выбор вида АЭО	Характеристика обрабатываемых каналов: непроточные каналы – орбитальная АЭО; проточные каналы с одинаковым количеством входных и выходных отверстий – двунаправленная АЭО; проточные каналы с различным количеством входных и выходных отверстий – однонаправленная АЭО
2	Разделение на зоны течения	Однонаправленная АЭО – 4 зоны. Двунаправленная АЭО – 3 или 4 зоны в зависимости от конфигурации входных и выходных отверстий
3	Зона 1. Рабочий цилиндр установки	Модель течения в круглом прямом канале. Зона начального осесимметричного и установившегося течения. Начальные условия задаются на штоке
4	Зона 2. Переходники для закрепления одноканальных деталей	Модель течения в диффузоре. Зона перестройки профиля потока от круглого к профилю обрабатываемого канала. Начальные условия находятся из решения течения в зоне 1. Решение течения в зоне 2 задает начальные условия зоны 3
5	Зона 2. Переходники для закрепления многоканальных деталей	Модель течения в диффузоре и/или кольцевом канале. Начальные условия находятся из решения течения в зоне 1. При задании начальных условий для зоны 3 необходимо дать оценку равномерности расхода РС во всех обрабатываемых каналах и рассмотреть перестройку профиля потока на входном отверстии каждого канала
6	Зона 3. Каналы детали	Модели течения для различных каналов
7	Зона 2. Влияние переходников на процесс истечения потока из каналов детали	Для деталей с проточными каналами с одинаковым количеством входных и выходных отверстий модели течения являются обратносимметричными во входных зонах 2. Для однонаправленной АЭО зона 4 – модель свободного истечения и оценка эффекта упругого восстановления струи
8	Зона 1. Рабочий цилиндр установки для АЭО	Модель течения в круглом прямом канале. Расчет является проверочным. Для АЭО с системой противодавления решается обратная задача оценки влияния выходного давления на параметры потока в зонах 2 и 3

Механизм возникновения упругих деформаций в потоке РС при АЭО рассмотрен в [3].

На втором этапе осуществляется окончательный выбор требуемого состава рабочей среды как абразивного инструмента. Для этого установлены эмпирические зависимости таких упругих характеристик среды, как коэффициент Пуассона и модуль Юнга от параметров  $V_a$  и  $K_a$  [1]. Величину коэффициента эффективной вязкости  $\eta$  выбирают по разработанным рекомендациям в зависимости от геометрических характеристик обрабатываемого канала.

Разработка технологии АЭО на третьем и четвертом этапах ведется на базовом канале простой формы – круглое поперечное сечение постоянной формы. Для создания методики расчета фактической площади контакта, величины и направления сил, возникающих при контакте, а также размерности сближения (величины съема материала) при единичном контакте проведен анализ контактных процессов при АЭО [4].

Контакт рабочей среды (как абразивного инструмента) с деталью при АЭО имеет ряд особенностей. Вращение рабочей среды как абразивного инструмента в обрабатываемом канале отсутствует. В контакте находятся разные по физико-механическим свойствам тела, причем среда представляет собой композицию из самых твердых алмазных или абразивных зерен с вязкоупругой полимерной средой [5]. Контакт происходит при сдвиговом течении среды в достаточно узком диапазоне скоростей (0,001...0,1 м/с), а напряженно-деформированное состояние вязкоупругой основы определяет степень подвижности зерен в контакте. В контакте возникают температуры 30...250 °С, а градиент температур в среде и детали различный.

Экспериментально наблюдалось пристеночное вращение абразивного зерна совместно с некоторым объемом рабочей среды [6]. При этом частота вращения зависит от скорости сдвигового течения и размеров вращающегося объема среды и обеспечивает периодическую смену микронеровностей абразивного зерна, находящихся в контакте, что обуславливает эффект постоянного самозатачивания.

При расчете необходимо учитывать влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки [7].

Для расчета АЭО тонких осесимметричных каналов большой длины рекомендуется использовать модель течения рабочей среды, построенную на преобразованной модели Каргина–Слонимского–Рауза [8].

Расчеты на основе контактной модели на четвертом этапе показали, что суммарная производительность АЭО позволяет эффективно производить обработку любых материалов, начиная от сплавов цветных металлов и заканчивая труднообрабатываемыми поверхностями (сразу после литья или термообработки) [4].

Так, для обработки круглого канала с постоянным сечением радиусом  $R = 0,0125$  м в детали, выполненной из стали 12X18H10T (твердость НВ = 450, модуль упругости  $E = 220\,000$  МПа,  $\mu = 0,3$ ) и имеющей максимальную шероховатость  $R_{\max d} = 4,72$  мкм, радиус

микронеровностей  $\rho_d = 55$  мкм, коэффициенты для расчета опорной кривой  $b_d = 2$  и  $\nu_d = 1,6$ , была выбрана полидисперсная среда с приведенной зернистостью  $V_a = 320$  мкм. Данная среда имеет следующие характеристики: плотность среды  $\rho = 1\,410$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 0,116$  МПа,  $\mu = 0,4$ ,  $R_{\max i} = 40,2$  мкм,  $\rho_{i1} = 160$  мкм,  $b_{i1} = 1,7$  и  $\nu_{i1} = 1,1$ .

При установившемся режиме деформирования и величине сдвигающего давления на входе  $P_{вх} = 6$  МПа установлены фактические площади контакта микронеровностей. Общая фактическая площадь единичного упругопластического контакта микронеровностей  $A_c = 7 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>2</sup>. Сближение между поверхностями обрабатываемой детали и рабочей среды на единичную микронеровность при упругом контакте составило 0,6 мкм, при пластическом контакте – 0,037 мм. Такая величина пластического сближения обусловлена течением основы, вызванным перемещением абразивного зерна в контакте. Объем мгновенно снимаемого слоя материала за один контакт составил  $2,871 \cdot 10^{-8}$  мм<sup>3</sup>. Изменение шероховатости микронеровности за один контакт равно 0,000 124 мкм.

Исходя из общего количества абразивных зерен, вступивших в контакт с рассматриваемой микронеровностью поверхностного слоя, рассчитаны изменение шероховатости, и величина износа по времени. Поскольку модуль упругости  $E$  среды на несколько порядков меньше, чем у материала обрабатываемой детали, удаление материала детали на единичном контакте происходит на наноуровне. Следует учитывать, что за один цикл экструзии единичная микронеровность поверхности, в зависимости от объема рабочей установки для АЭО и размеров обрабатываемого канала, вступает в контакт приблизительно от 500 до 10 000 раз.

На пятом этапе полученные результаты контактных взаимодействий накладываются на поле распределения расходно-напорных характеристик потока среды в обрабатываемом канале. Верификация расчетных данных показывает, что расхождение составляет не более 5 %. На основании методики создан информационно-расчетный модуль и разработана технология АЭО детали типа корпус крыльчатки.

На шестом этапе назначаются параметры технологического процесса абразивно-экструзионной обработки конкретных деталей.

Внедрение методики обеспечило сокращение объема и сроков экспериментальных исследований при разработке технологических процессов АЭО новых деталей.

#### Библиографический список

1. Экспериментальное определение коэффициентов вязкости, упругости и пластичности рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / П. А. Снетков, В. А. Левко, М. А. Лубнин, Е. Б. Пшенко // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 134–138

2. Левко В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 7. С. 96–100.

3. Левко В. А. Абразивно-экструзионная обработка: современный уровень и теоретические основы процесса : монография ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007.

4. Левко В. А. Расчет шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий // Авиационная техника. Известия вузов / под ред. проф. В. А. Фирсова ; Казан. гос. техн. ун-т. 2009. № 1. С. 59–62.

5. Левко В. А. Контактные процессы при абразивно-экструзионной обработке // Металлообработка. 2008. № 3 (45). С. 19–23.

6. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко, М. А. Лубнин, П. А. Снетков и др. // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 138–145.

7. Левко В. А., Пшенко Е. Б. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных деталей // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 11. С. 64–68.

8. Левко В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины // Вестник Чебоксар. гос. педаг. ун-та. Механика предельного состояния : сб. науч. тр. / под ред. акад. Д. И. Ивлева ; Чувашск. гос. педаг. ун-т. Чебоксары, 2008. № 2. С. 85–94.

V. A. Levko, M. A. Lubnin, S. K. Sysoev, A. S. Sysoev, L. P. Sysoeva

#### METHOD OF ASSESSMENT OF ACCURACY, QUALITY AND EFFICIENCY OF ABRASIVE FLOW PROCESSING OF SPAIR PARTS

*The technique, which allows to significantly reduce the costs of research have been completed. All the stages of evaluating the accuracy, quality and efficiency are described.*

*Keywords: abrasive flow machining, annular gap, medium, cross-sectional area, leveling device.*

© Левко В. А., Лубнин М. А., Сысоев С. К., Сысоев А. С., Сысоева Л. П., 2011

УДК 621.316

Е. А. Мизрах, А. С. Сидоров, С. Б. Ткачев

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА АДМИТАНС И УСТОЙЧИВОСТЬ ИМИТАТОРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ С КАСКАДНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ\*

*Исследовано влияние динамических свойств импульсных стабилизаторов напряжения на адмитанс и устойчивость имитаторов солнечных батарей с каскадным включением непрерывного и импульсного усилителей мощности. Сформулированы ограничения на параметры сглаживающего LC-фильтра импульсного стабилизатора напряжения.*

*Ключевые слова: импульсный стабилизатор напряжения, имитатор солнечной батареи, устойчивость, адмитанс.*

В настоящее время одной из перспективных топологий имитаторов солнечных батарей (ИСБ) (рис. 1), позволяющей с требуемой точностью воспроизводить ВАХ и импеданс (адмитанс) солнечных батарей мощностью более 1 кВт, является топология ИСБ с каскадным включением непрерывного и импульсного усилителей мощности (рис. 1, а), где ограничение мощности рассеивания непрерывного усилителя мощности (НУМ) осуществляется путем стабилизации напряжения на его регулирующих элементах (РЭ) с помощью импульсного усилителя мощности (ИУМ). Данная топология строится на основе другой топологии – ИСБ последовательного типа (рис. 1, б).

Вопросы устойчивой работы ИСБ последовательного типа и влияния импеданса источника питания на адмитанс имитатора достаточно хорошо проработаны в [1; 2]. Но, в ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ в отличие от ИСБ последовательного типа появляется еще одна отрицательная связь по напряжению, причем ИУМ стабилизирует только часть своего выходного напряжения, а другая часть определяется нагрузкой. Актуальными являются вопросы влияния динамических свойств импульсного стабилизатора напряжения на устойчивость и адмитанс ИСБ с каскадным включением НУМ и ИУМ.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (ГК №П530).