

Гидроструйный способ контроля параметров технологических процессов в ракетно-космической технике

© Е.В. Леун¹, В.К. Сысоев¹, В.В. Шалай², Е.Е. Ломонова³,
А.Е. Шаханов¹, П.А. Вятлев¹

¹ АО «НПО им. С.А. Лавочкина», г. Химки, 141400, Россия

² Омский государственный технический университет, г. Омск, 644050, Россия

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, 119991, Россия

Представлен разработанный гидроструйный способ контроля параметров технологических процессов, применяемых в ракетно-космической отрасли. В качестве так называемого жидкого световода используются струи жидкости (например, на основе смазочно-охлаждающей жидкости), направленные на контролируемое изделие. Поверхность изделия является отражателем для оптического излучения, распространяющегося вдоль струи к изделию и обратно. Определены основные взаимосвязи между оптическими, гидродинамическими, метрологическими и другими параметрами для разных режимов работы гидроструйного способа контроля параметров технологических процессов при активном контроле размеров изделий. Практическая реализуемость данного способа контроля подтверждена результатами расчетов его основных характеристик.

Ключевые слова: струя жидкости, жидкий световод, двунаправленная передача оптического потока, гидроструйный способ контроля

Введение. Гидроструйные технологии имеют хорошие перспективы применения в ракетно-космической технике [1]. Одним из новых направлений их развития стали начатые в 2015 г. работы по созданию гидроструйного способа контроля параметров технологических процессов (в дальнейшем — гидроструйный способ контроля). Его идея заключается в использовании направленной струи прозрачной жидкости в качестве жидкого световода. Эта жидкость, поливая контролируемое изделие с образованием так называемого гидравлического контакта и являясь частью оптического измерительного канала измерителя, формирует гидрооптический канал для двунаправленной передачи оптического потока к изделию и обратно. Это позволяет реализовать новые функциональные возможности (рис. 1):

1) измерение положения/перемещения текущей координаты гидравлического контакта струи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) или близкой ей по физико-техническим параметрам (с сохранением свойств смазки и охлаждения) с поверхностью изделия для измерения размеров изделий, в том числе в режиме активного контроля и/или путем внутренних каналов инструмента (резцы, сверла, фрезы и т. п.) на металлообрабатывающих станках (рис. 1, а–г);

2) измерение текущей координаты поверхности изделия при воздействии высокоскоростной струи жидкости в гидро- и гидроабразивной обработке (в том числе гидродиагностике) материалов (рис. 1, д–е);

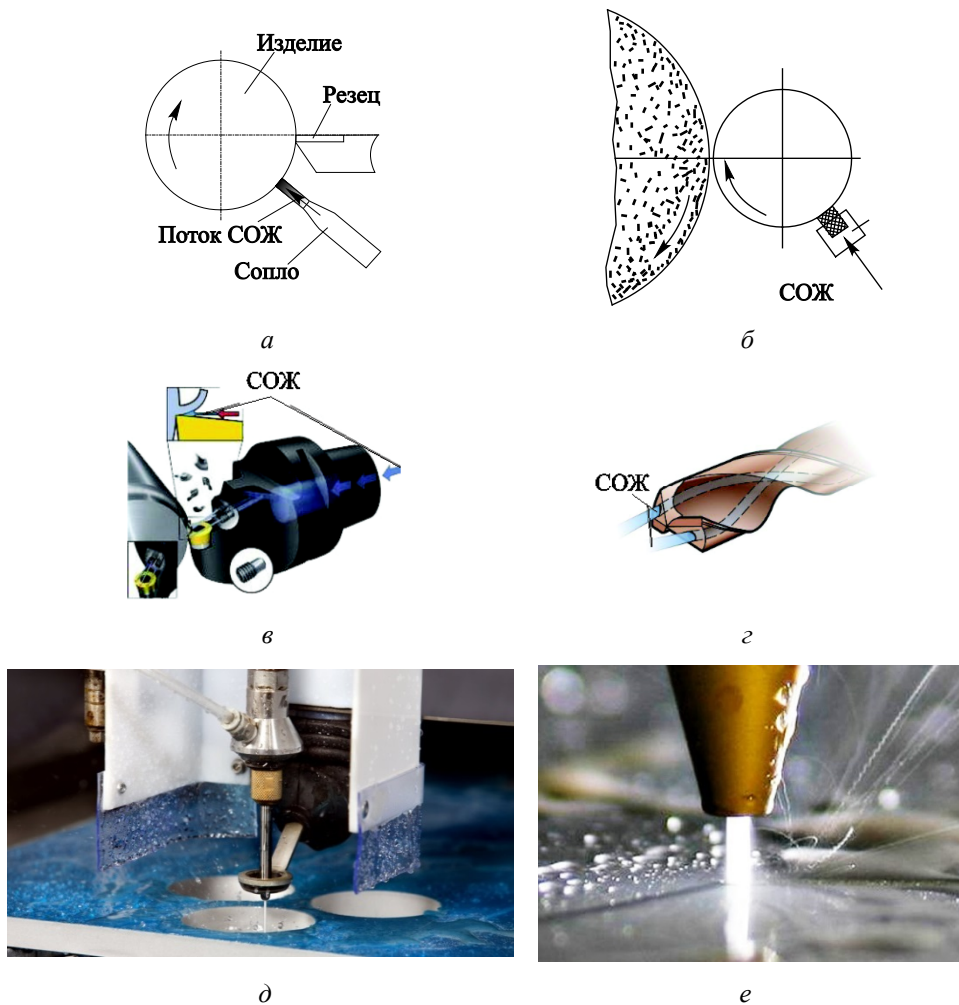


Рис. 1. Варианты применения гидроструйного способа контроля на токарном (а) и круглошлифовальном станках (б), при использовании внутренних каналов в резце (в) или фрезе (з), при гидрорезке (д, е)

3) реализация вибродиагностических и акустоэмиссионных методов контроля текущего состояния изделий, оборудования;

4) визуализация и регистрация поверхности контролируемого изделия;

5) контроль температуры пирометрическим методом измерения.

Цель данной работы — на основе результатов исследований одномодового [2] и многомодового [3] режимов передачи света струей для измерения положения текущей координаты гидравлического кон-

такта струи с поверхностью изделия для активного контроля размеров изделий на металлообрабатывающих станках выявить возможности дальнейшего развития представленного способа.

Принцип действия гидроструйного способа контроля. В устройстве, с помощью которого реализуется разработанный гидроструйный способ контроля (рис. 2), используются камера 2 с соплом 1 и насосом 3, оптоэлектронная схема 4, световод 5, контролируемое изделие 8, двунаправленный оптический поток 7, направленная струя жидкости 6.

В камере 2 с помощью насоса 3 создают давление P_0 жидкости, заставляя вытекать ее направленной струей 6 из сопла 1 потоком длиной $L_{стр}$ и диаметром $D_{стр}$ к изделию 8. Оптоэлектронная схема 4 со световодом 5 предназначена для освещения оптическим излучением струи 6 с возможностью двунаправленной передачи излучения струи 6 к поверхности изделия 8 и обратно. Отраженное от поверхности изделия 8 оптическое излучение следует обратно через струю 6, световод 7 и возвращается в оптоэлектронную схему 4 для формирования выходного сигнала $U_{вых}$.

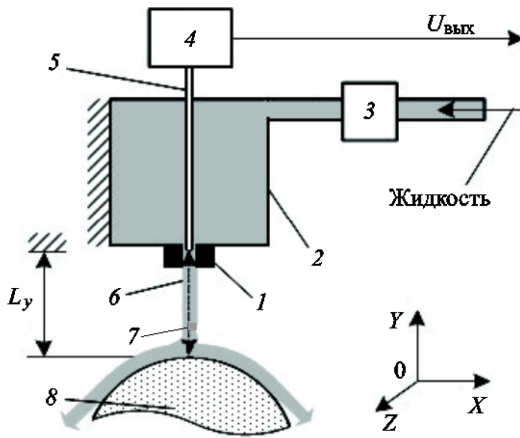


Рис. 2. Устройство для реализации гидроструйного способа контроля:

1 — сопло; 2 — камера; 3 — насос; 4 — оптоэлектронная схема; 5 — световод; 6 — направленная струя жидкости; 7 — оптический поток; 8 — контролируемое изделие

Режим работы гидроструйного способа контроля зависит от типа и формы струи, которые могут быть различных видов (рис. 3): капельной, ламинарного, турбулентного, диспергированного потоков. Типы струи зависят от многих параметров и существенно влияют на параметры проходящего через нее двунаправленного оптического потока и соответственно получаемые технические характеристики и

функциональные возможности контролируемых процессов. Дальнейшее исследование представлено для гидроструйного способа контроля с одномодовым и многомодовым режимами передачи света и с ламинарным и турбулентным режимами течения струи.

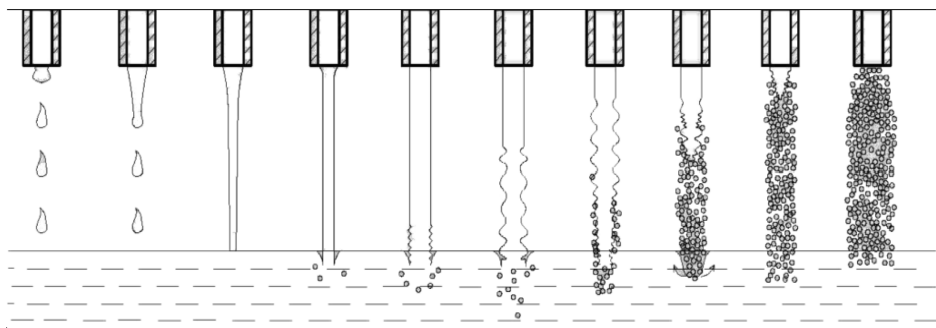


Рис. 3. Различные типы и формы струй для разных параметров течения жидкости [4]

Одномодовый режим работы гидроструйного способа контроля. Данный режим работы гидроструйного способа контроля предполагает реализацию одномодового режима передачи света, реализованного на основе одномодового волокна [2]. В качестве измерителя можно использовать высококогерентный лазерный интерферометр перемещений.

Реализация предложенного способа основана на соотношениях оптических, гидродинамических, метрологических и других параметров с учетом допущения о том, что выбранные жидкости несжимаемы, а формируемые ими струи являются цилиндрическими с постоянным диаметром по всей длине.

Анализ оптических и гидродинамических параметров. Итак, в рассматриваемом гидроструйном способе контроля размеров изделий световодом является жидкая струя диаметром $D_{стр}$, а оболочкой — воздух, при этом должны выполняться следующие условия:

- одномодовый режим передачи света по жидкостной струе со значением нормализованной частоты $\nu_{од} = 2,4$;

- ламинарный режим движения жидкости со значением числа Рейнольдса $Re = 2300$;

- максимальная сила давления на поверхность изделия F_n не должна превышать 3 Н, подобно силе, возникающей в процессе выхода наконечника из впадины на выступ при контактом контроле размеров изделий с прерывистой поверхностью [5].

Эти условия объединены в систему уравнений

$$\begin{cases} v_{\text{од}} = 2,4; \\ \text{Re} = 2300; \\ F_{\text{н}} = 3 \end{cases} \quad (1)$$

и представлены в [2], где на основе анализа оптических и гидродинамических параметров, связанных между собой, показано, что из первых двух уравнений системы (1) при условии ламинарного режима течения струи жидкости с максимальным значением $\text{Re} = 2300$ на основании уравнения Бернулли формируется первое уравнение системы

$$\begin{cases} \lambda_c = 3010,7v\sqrt{\frac{\rho(n_1^2 - 1)}{2p_0}}; \\ v_{\text{стр}} = \frac{1,95}{D_{\text{стр}}\sqrt{\rho}}, \end{cases} \quad (2)$$

где λ_c — длина волны отсечки; v — вязкость жидкости; ρ — плотность жидкости; n_1 — показатель преломления жидкости струи; p_0 — избыточное давление в камере.

Третье уравнение системы (1) с учетом выражения, связывающего скорость $v_{\text{стр}}$ и диаметр струи $D_{\text{стр}}$ с плотностью жидкости ρ , преобразуется во второе уравнение системы (2).

Полученная в итоге система уравнений (2) определяет граничные условия при реализации рассматриваемого струйного способа контроля для одномодового режима передачи света, ламинарного режима течения жидкости в струе с максимальным значением числа Рейнольдса Re и максимальной силой давления на поверхность изделия $F_{\text{н}}$.

Анализ метрологических параметров. Согласно [2] максимальный диапазон измерений $L_{\text{диап}}$ определяется максимальной длиной цельной, компактной части струи $L_{\text{стр}}$ до распада ее на отдельные капли, приводящего к нарушению одномодового режима передачи света, определяемой при соблюдении условия $\sqrt{\gamma D_{\text{стр}} / 2\rho v^2} \leq 1$ по формуле $L_{\text{стр}} = 8,46v_{\text{стр}}\sqrt{\rho D_{\text{стр}}^3 / 8\gamma}$, где γ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Расчеты показывают [2], что для общедоступных значений гидродинамических параметров вполне достижимы значения $L_{\text{стр}}$ до 521 мм (для глицерина) и 175 мм (для воды).

Для оценки погрешности измерений взяты хорошо изученные гетеродинные акустооптические интерферометры перемещений. Как упомянуто в [6], в лазерных интерферометрах с акустооптоэлектронной обратной связью экспериментально достигнута разрешающая способность на уровне примерно $\lambda/1000$. Однако наибольший вклад в

суммарную погрешность измерений Δl вносит погрешность, определяемую условиями окружающей среды, особенно температурная погрешность δ_t . В итоге суммарная погрешность измерений Δl для реальных производственных условий обычно оценивают не выше, чем $\lambda/500$.

Анализ динамических параметров. Оценка динамических параметров важна для автоматического контроля изделий, в первую очередь при двухконтактных измерениях, например, на круглошлифовальном станке, когда изделие может описывать сложную вращающуюся траекторию движения с появлением высокочастотных биений (вибраций, колебаний) и соответствующих радиальных смещений. Во избежание возникновения динамической погрешности измерений, вплоть до полного срыва непрерывного процесса измерений, скорость таких смещений $v_{\text{рад}}$ не должна превышать скорость движения жидкости в струе $v_{\text{стр}}$ и максимальную скорость движения изделий $v_{\text{инт}}$, контролируемую лазерным интерферометром.

Расчетами в [2] показано, что скорость $v_{\text{инт}}$ в современных акустооптических лазерных интерферометрах достигает значений не менее $0,2 \dots 0,5$ м/с.

Скорость радиальных смещений, рассчитанная также в [2], не превышает значений $0,3 \cdot 10^{-3}$ м/с. Таким образом, $v_{\text{стр}} \gg v_{\text{инт}} \gg v_{\text{рад}}$. Это свидетельствует о том, что данное техническое решение обладает достаточным быстродействием для измерения размеров изделий. При реализации двухконтактного способа контроля эти высокочастотные биения могут быть полностью измерены и скомпенсированы.

Анализ источников лазерного излучения. Как показано в [2], для одномодового режима работы характерны слишком жесткие соотношения, связывающие диаметр струи $D_{\text{стр}}$ и длину волны λ источника излучения высококогерентного лазерного интерферометра перемещений. Так, либо необходимо использовать малый диаметр струи — на уровне единиц-десятков мкм, что для глицерина или воды, составляющих основу современных СОЖ, трудно реализуемо на практике, либо нужны лазеры для дальнего ИК-диапазона с длиной волны $\lambda \approx 500 \dots 2000$ мкм, что в реальности приводит к большим проблемам при работе с ними. С этой точки зрения одномодовый режим измерения достаточно трудно реализовать.

Очевидно, что применение режима работы гидроструйного способа контроля, при котором струя жидкости используется в качестве жидкого световода с одномодовым режимом передачи света и высококогерентным лазерным интерферометром перемещений, не позволяет достичь ожидаемых высоких технических характеристик.

Вероятно, единственным альтернативным вариантом может быть использование направленной ламинарной струи жидкости диаметром $D_{\text{стр}}$, существенно большим, чем диаметр двунаправленного оптиче-

ского потока $D_{\text{опт}}: D_{\text{стр}} \gg D_{\text{опт}}$. Это позволит считать струю оптически прозрачным столбом, без искажающих переотражений, не влияющим на процесс распространения оптического потока и обеспечивающим высокие метрологические параметры, свойственные для высококогерентных лазерных интерферометров перемещений.

Многомодовый режим работы гидроструйного способа контроля. Многомодовый режим работы также важен для исследования, поскольку многие требования, предъявляемые к устройству (см. рис. 2), снижаются благодаря возможности применения турбулентной (и даже диспергирующей) струи 6, а в качестве измерителя 4 и световода 5 — соответственно волоконного низкокогерентного интерферометра и многомодового волокна.

Для реализации данного способа критичными являются два параметра:

– длина цельной, компактной части струи до распада ее на капли, значение которой исходя из конструктивных требований должно составлять не менее 4 мм;

– сила давления струи на поверхность изделия $F_{\text{н}}$, которая не должна превышать 3 Н [5].

Для этих условий в работе [3] ранее уже были получены уравнения, которые можно объединить в систему, используемую при проведении гидродинамических расчетов:

$$\begin{cases} L_{\text{стр}} = 8,46v_{\text{стр}}\sqrt{\rho D_{\text{стр}}^3 / 8\gamma} = 4; \\ F_{\text{н}} = \frac{\pi\rho D_{\text{стр}}^2 v_{\text{стр}}^2}{4} = 3. \end{cases} \quad (3)$$

Так, было определено, что для диаметра струи 1000 мкм с давлением 1,91 МПа для глицерина, вытекающей со скоростью 55 м/с, давление на поверхность не превысило 3 Н, число Рейнольдса составило примерно 313 и свидетельствовало о ламинарном режиме течения, а длина цельной части струи до распада ее на капли была равна примерно 721 мм. Как видно, полученные данные являются весьма удовлетворительными для практического использования.

Достижимая точность измерений в данном режиме работы, как правило, не превышает долей λ и уступает точности высококогерентных лазерных интерферометров перемещений, что компенсируется общим упрощением оптоэлектронной схемы.

Визуализация и регистрация технологических процессов в динамическом режиме. Обеспечение возможности визуализации поверхности изделия струей жидкости и последующей регистрации изображения с помощью высокоскоростной фото- или видеосъемки

является важной для данного способа. Реализация этого основывается на условиях, что жидкость будет иметь окно прозрачности для длин волн, используемых для регистрации, и сохранения регулярности передаваемого изображения благодаря ламинарности потока и недопущению диспергирования струи.

Контроль температуры изделия пирометрическим методом измерения. Близкой к предыдущей возможности является передача инфракрасного (ИК) излучения струей для измерения температуры пирометрическим способом. Известно, что вода активно поглощает ИК-излучение. Однако можно подобрать состав СОЖ с окном прозрачности для среднего ИК-излучения с максимумом излучения в диапазоне длин волн 7...15 мкм и возможностью измерения, например, до 50...100 °С. При этом собственная теплопроводность и теплоемкость жидкости струи погрешности измерений будут способствовать увеличению, однако это может быть скомпенсировано общим повышением информативности измерений.

Практическая реализация узлов гидроструйного способа контроля. Для понимания возможностей создания и практической отработки гидроструйного способа контроля далее описаны его основные узлы с измерителем на основе волоконного низкокогерентного интерферометра.

Высокопрочное износо- и трещиностойкое сопло. В связи с высокими нагрузками на сопло, приводящими к его быстрому износу, при гидрообработке и особенно при гидроабразивной резке возникает потребность в использовании высокопрочных материалов с высокой износо- и трещиностойкостью. В качестве материалов для таких сопел перспективно использовать прочную керамику на основе оксида алюминия, получаемую магнитно-импульсным прессованием композитных нанопорошков. Для этой технологии получено наилучшее сочетание механических свойств микротвердости и трещиностойкости (19,4 ГПа и $7,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$), реализованной для керамики, из композитного нанопорошка с 15%-ным содержанием металлической фракции при давлении прессования 0,3 ГПа и температуре спекания 1550 °С [7]. Для материалов на основе наноструктурированных кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ), разработанных в Институте общей физики РАН, в приведенном выше сочетании достигнута более высокая трещиностойкость: 13,2 ГПа — $10,0 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ [8].

Средства визуализации. Обеспечение возможности визуализации поверхности изделия 8 может быть реализовано в результате применения в качестве оптоэлектронной схемы 4 (см. рис. 2) регистратора на основе быстродействующей ПЗС-камеры, а в качестве световода 5 — оптического элемента, сохраняющего регулярность

при передаче изображения, например, эндоскопов ультратонких видов — бороскопов. Представляется, что передача изображения возможна при превышении диаметра струи $D_{\text{стр}}$ над диаметром бороскопа $D_{\text{бор}}$ как минимум в 3 раза, т. е. $D_{\text{стр}} \approx 3D_{\text{бор}}$. В наши дни минимальный диаметр бороскопа может достигать 0,8...0,9 мм с применением элементов градиентной оптики [9], вносящих минимальные искажения при передаче изображения, и 0,37...0,50 мм с использованием плотно упакованных регулярных японских кварцевых волокон, искажения которых определяются ячеистой структурой соединения волокон. Исходя из этого минимальный диаметр струи $D_{\text{стр}}$ должен быть не менее 1 мм для волоконных бороскопов и около 2,5 мм для градиентных бороскопов, что достаточно успешно можно реализовать для разных задач.

Волоконный низкокогерентный интерферометр. Как показано выше, измерение текущей координаты поверхности изделия 8 (см. рис. 2) на практике может быть реализовано многомодовым режимом передачи оптического потока струей 6 и применением в качестве оптоэлектронной схемы 4 низкокогерентного интерферометра, а в качестве световода 5 — многомодового волокна.

Активные исследования волоконных низкокогерентных интерферометров [10, 11] показывают преимущества так называемого тандемного варианта волоконного низкокогерентного интерферометра (рис. 4), обладающего существенным достоинством — нечувствительностью к длине оптического пути между коррелометром и образцом.

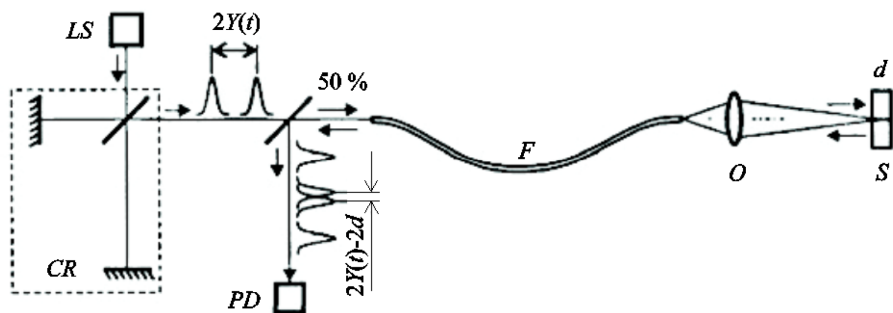


Рис. 4. Тандемный вариант волоконного низкокогерентного интерферометра (на примере измерения толщины образца S):

LS — источник света с широким спектром; CR — оптический коррелометр; F — оптическое волокно; S — образец; O — проекционный объектив; PD — фотоприемник

Проекционный объектив O (см. рис. 4) на основе микрооптики с диаметром не более 0,5...2,0 мм будет малогабаритным, благодаря чему тандемный вариант волоконного низкокогерентного интерфе-

рометра можно встраивать в обрабатывающее оборудование для обеспечения различных технологических процессов (см. рис. 1).

Выводы. 1. Определены основные взаимосвязи между оптическими, гидродинамическими, метрологическими и другими параметрами для разных режимов работы гидроструйного способа контроля параметров технологических процессов при активном контроле размеров изделий.

2. Показаны основные функциональные возможности и представлены результаты расчетов основных характеристик данного способа контроля, подтверждающие его практическую реализуемость.

3. Показаны варианты реализации отдельных узлов гидроструйного способа контроля: для высокопрочных износо- и трещиностойких сопел, средств визуализации, а также тандемный вариант волоконного низкокогерентного интерферометра.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий в ракетно-космической технике. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html> (дата обращения 29.12.2016).
- [2] Леун Е.В. Гидроструйный интерферометрический способ контроля размеров изделий. *Материалы X Международной IEEE научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин»*, 2016, № 1, т. 2, Омск, 2016, с. 101–109.
- [3] Леун Е.В. Особенности построения перспективных лазерных способов активного контроля размеров изделий. *Материалы X Всеросс. научн. конф. памяти главного конструктора ПО «Полет» А.С. Клинышкова*. Омск, 2016, с. 68–74.
- [4] Агаев К.Э., Дужий А.Б., Новоселов А.Г. Исследование геометрических параметров свободных жидкостных струй при течении в КСИА в условиях начального устойчивого режима работы. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*, 2012, № 1. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20317052> (дата обращения 29.12.2016).
- [5] Леун В.И., Тигнибидин А.В. Новые принципы построения приборов активного контроля для изделий инструментальных производств и машиностроения. *Омский научный вестник*, 2010, № 2 (90), с. 165–169.
- [6] Леун Е.В. Особенности схемотехники акустооптических лазерных систем для измерения перемещений с фазоцифровым преобразованием. *Технология машиностроения*, 2002, № 5, с. 33–39.
- [7] Иванов В.В., Кайгородов А.С., Хрустов В.Р., Паранин С.Н., Спиринов А.В. Прочная керамика на основе оксида алюминия, получаемая с использованием магнитно-импульсного прессования композитных нанопорошков. *Российские нанотехнологии*, 2006, т. 1, № 1–2, с. 201–207.
- [8] Борик М.А., Бублик В.Т., Вилкова М.Ю., Кулебякин А.В. и др. Структура, фазовый состав и механические свойства кристаллов ZrO_2 , частично стабилизированных Y_2O_3 . *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, 2014, № 1 (65), с. 58–64.

- [9] Жесткие тонкие эндоскопы (бороскопы) производства ООО «НПП ЭКОМП» (Республика Беларусь). URL: http://www.nppcomp.ru/rus/dok/h_end.htm (дата обращения 28.12.2016).
- [10] Иванов В.В. Развитие методов низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук, 01.04.01. Нижний Новгород, 2005, с. 20.
- [11] Волков П.В. Развитие интерференционных и поляризационных методов измерения физических параметров твердых тел. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук, 01.04.01. Нижний Новгород, 2009, с. 20.

Статья поступила в редакцию 20.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Леун Е.В., Сысоев В.К., Шалай В.В., Ломонова Е.Е., Шаханов А.Е., Вятлев П.А. Гидроструйный способ контроля параметров технологических процессов в ракетно-космической технике. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1675>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на ХLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.

Леун Евгений Владимирович — ведущий инженер, АО «НПО им. С.А. Лавочкина». e-mail: leun@laspace.ru

Сысоев Валентин Константинович — заместитель начальника комплекса, АО «НПО им. С.А. Лавочкина». e-mail: sysoev@laspace.ru

Шалай Виктор Владимирович — Омский государственный технический университет. e-mail: info@omgtu.ru

Ломонова Елена Евгеньевна — руководитель лаборатории, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН. e-mail: lomonova@lst.gpi.ru

Шаханов Александр Евгеньевич — заведующий отделом, АО «НПО им. С.А. Лавочкина». e-mail: shakhanov@laspace.ru

Вятлев Павел Александрович — заместитель заведующего отделом, АО «НПО им. С.А. Лавочкина». e-mail: vyatlev@laspace.ru

Hydrojet-based parameter control method for aerospace manufacturing processes

© E.V. Leun¹, V.K. Sysoev¹, V.V. Shalay², E.E. Lomonova³,
A.E. Shakhnov¹, P.A. Vyatlev¹

¹ Lavochnik Science and Production Association, Khimki, 141400, Russia

² Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russia

³ A.M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow,
119991, Russia

The article presents a newly developed hydrojet-based method for controlling manufacturing process parameters. Fluid jets (for instance, those of cutting fluid) directed towards the gauged workpiece form a so-called liquid optical fiber. The workpiece surface reflects the optical radiation that propagates along the jet towards the workpiece and back. We determine fundamental relations between various parameters, such as optical, hydrodynamic, metrological and others, for different operation modes of the hydrojet-based manufacturing process parameter control method during in-process workpiece dimension gauging.

Keywords: *jet, liquid optical fiber, bidirectional optical flow transmission, hydrojet-based control method*

REFERENCES

- [1] Tarasov V.A., Galinovskiy A.L. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 3. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html> (accessed December 29, 2016).
- [2] Leun E.V. Gidrostruynnyy interferometricheskii sposob kontrolya razmerov izdeliy [Hydrojet interferometry-based workpiece dimension control method]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines. Proc. of the 10th International scientific and engineering conference], 2016, no. 1, vol. 2, Omsk, 2016, pp. 101–109.
- [3] Leun E.V. Osobennosti postroeniya perspektivnykh lazernykh sposobov aktivnogo kontrolya razmerov izdeliy [Specifics of developing promising laser techniques of in-process workpiece dimension control]. *Materialy X Vseross. nauchn. konf. pamyati glavnogo konstruktora PO Polet A.S. Klinyshkova* [Proc. of the 10th pan-Russian scientific conference in memory of A.S. Klinyshkov, Chief Designer of Production Association Polyot]. Omsk, 2016, pp. 68–74.
- [4] Agaev K.E., Duzhiy A.B., Novoselov A.G. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Ser. Protssy i apparaty pishchevykh proizvodstv — Scientific Journal NRU ITMO. Processes and Food Production Equipment*, 2012, no. 1. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20317052> (accessed December 29, 2016).
- [5] Leun V.I., Tignibidin A.V. *Omskiy nauchnyy vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2010, no. 2 (90), pp. 165–169.
- [6] Leun E.V. *Tekhnologiya mashinostroeniya — Journal “Tekhnologiya mashinostroeniya”* [Mechanical engineering technology], 2002, no. 5, pp. 33–39.
- [7] Ivanov V.V., Kaygorodov A.S., Khrustov V.R., Pararin S.N., Spirin A.V. *Rossiyskie nanotekhnologii — Nanotechnologies in Russia*, 2006, vol. 1, no. 1–2, pp. 201–207.

- [8] Borik M.A., Bublik V.T., Vilkova M.Yu., Kulebyakin A.V. et al. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy Elektronnoy Tekhniki — Materials of Electronics Engineering*, 2014, no. 1 (65), pp. 58–64.
- [9] *Zhestkie tonkie endoskopy (boroskopy) proizvodstva OOO NPP EKOMP (Respublika Belarus)* [Thin rigid endoscopes (borescopes) manufactured by ECOMP Ltd. (Belarus Republic)]. Available at: http://www.nppecomp.ru/rus/dok/h_end.htm (accessed December 28, 2016).
- [10] Ivanov V.V. *Razvitie metodov nizkokogerentnoy volokonno — opticheskoy interferometrii. Avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Development of low-coherence fiber optic interferometry techniques. Autoref. cand. phys.-math. sc. diss.], 01.04.01. Nizhny Novgorod, 2005, p. 20.
- [11] Volkov P.V. *Razvitie interferentsionnykh i polarizatsionnykh metodov izmereniya fizicheskikh parametrov tverdykh tel. Avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Development of interferometry- and polarization-based techniques for measuring physical parameters of solids. Autoref. cand. phys.-math. sc. diss.], 01.04.01. Nizhny Novgorod, 2009, p. 20.

Leun E.V., Leading Engineer, Lavochkin Science and Production Association.
e-mail: leun@laspace.ru

Sysoev V.K., Deputy Head of Complex, Lavochkin Science and Production Association.
e-mail: sysoev@laspace.ru

Shalay V.V., Omsk State Technical University. e-mail: info@omgtu.ru

Lomonova E.E., Head of Laboratory, A.M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences. e-mail: lomonova@lst.gpi.ru

Shakhanov A.E., Head of Department, Lavochkin Science and Production Association.
e-mail: shakhanov@laspace.ru

Vyatlev P.A., Deputy Head of Department, Lavochkin Science and Production Association. e-mail: vyatlev@laspace.ru