

К ВОПРОСАМ ПОСТРОЕНИЯ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ: АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ, ДИНАМИЧЕСКИХ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОГО ИЗДЕЛИЯ

Статья посвящена вопросам использования струйно-капельных оптических измерительных систем для измерений отклонений формы, в том числе шероховатости поверхности изделий при обработке. Рассматриваются вопросы передачи изображения, управления фокусным расстоянием за счет слияния нескольких капель одного или нескольких гидротоков. Обсуждаются вопросы передачи изображения движущимися и упавшими на поверхность обрабатываемого изделия каплями.

Представлена методика расчета требований по быстродействию, предъявляемых к регистрации изображения микроскопа совместно с движущейся каплей, в зависимости от ее размеров, используемой жидкости и скорости ее движения. Рассматривается разработанная методика расчета погрешности позиционирования движущихся капель для одно- и двухосевого управления траекторией движения капельного потока.

Ключевые слова: струйно-капельная оптическая измерительная система, электрокапелеструйное устройство, управляемый капельный поток, слияние капель, позиционирование капли, вынужденный капиллярный распад струи, капельный микроскоп.

Введение. В современное время в ракетно-космических отраслях, станко-, машино- и приборостроении активно совершенствуются технологии, связанные с измерением и контролем, в том числе активным («в процессе»), различных размерных параметров обрабатываемых изделий на различных металлорежущих станках.

В 2017–2018 гг. появились первые публикации [1–6], связанные с использованием для подобных целей струйно-капельных оптических измерительных систем (СКОИС). В их основе лежит использование управляемых струи и/или когерентного монодисперсного капельного потока (в дальней-

шем — капельный поток) в качестве оптических элементов измерительной системы. Эта зарождающаяся технология основана на работах по использованию подобных потоков, в первую очередь, в задачах высокоточного дозирования и космического теплообмена [7, 8], автоматизированной электрокапелеструйной маркировки [9] и нанесения жидкостей на химические нити [10].

Особенности технологии обработки изделия естественно накладывают ограничения на оптические, динамические и метрологические характеристики используемых движущихся капель управляемого капельного потока. Этот вопрос недостаточно

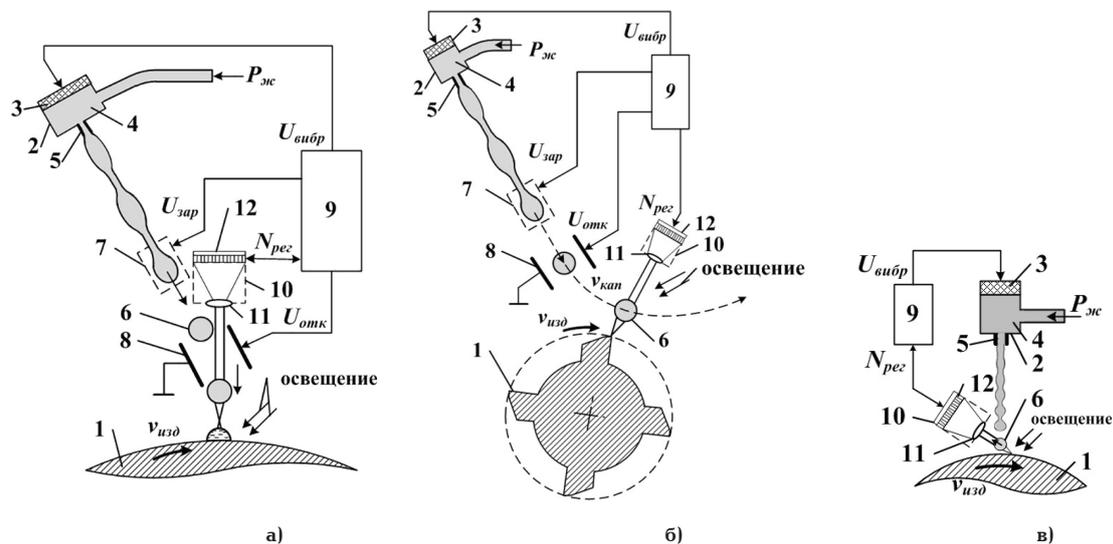


Рис. 1. Схемы СКОИС для визуализации поверхности обрабатываемого изделия

полно описан в открытой печати и данная статья направлена на хотя бы частичное устранение этого недостатка.

1. Схемы СКОИС для визуализации поверхности обрабатываемого изделия. Наиболее подробно состав, принцип и режимы работы СКОИС описаны в работах [4–6]. Устройства СКОИС, реализующие т.н. капельный микроскоп, показаны на рис. 1. На рис. 1а обозначены изделие 1, генератор капель 2, включающий емкость с прозрачной жидкостью 3, вибратор 4 и калиброванное сопло 5, капли 6, зарядное устройство (устройство сообщения униполярного заряда каплям) 7, отклоняющее устройство 8, схема управления 9, регистратор 10, включающий окуляр 11 и ПЗС-матрицу 12.

В разработанном микроскопе используется электрокапельструйное устройство [8] для формирования направленного монодисперсного когерентного капельного потока с заданной траекторией движения в направлении к поверхности изделия 1, в начале под острым углом, а после отклоняющего устройства 8 под прямым углом.

Итак, в емкость 4 генератора капля 2 под постоянным давлением $P_{ж}$ подается прозрачная жидкость, например, вода, выполняющая также роль смазочно-охлаждающей жидкости. На вибратор 3, выполненный на основе пьезоэлектрического преобразователя, с первого выхода схемы управления 9 подается переменный электрический сигнал $U_{вибр}$, формирующий на струе, вытекающей в режиме ламинарного течения из упрочненного сопла 5 диаметром d_c нарастающие вдоль струи по амплитуде колебания, приводящие в итоге к ее вынужденному капиллярному распаду (ВКР) и каплеобразованию.

Далее из струи формируется когерентный поток монодисперсных капель, движущийся прямолинейно под острым углом к поверхности изделия 1 со скоростью $v_{кан}$ 6 с управляемыми размерами $d_{кан}$. Диаметр формируемых капель $d_{кан}$ для описанного режима работы равен удвоенному диаметру струи или сопла: $d_{кан} \approx 2d_c$. Размеры капель могут быть до ≈ 1000 мкм, их сферичность и однородность по размеру не хуже 0,5 % и 0,1 % соответственно [8, 9].

При пролете через зарядное устройство 7 капля 6 получает управляемый статический заряд, пропорциональный подаваемому со второго вы-

хода схемы управления 9 напряжению $U_{зар}$ в диапазоне до нескольких киловольт. Двигаясь далее и пролетая через отклоняющее устройство 8, капля отклоняется им на угол, пропорциональный амплитуде сигнала $U_{отк}$, поступающего с третьего выхода схемы управления 9, подобно тому, как отклоняется и направляется в заданную точку электрон в кинескопе телевизора. При этом прямолинейная траектория движения капли 6 меняется на криволинейную.

Выполняя за счет прозрачности жидкости в пределах длин волн освещения $\lambda_1 \dots \lambda_2$ функцию оптической линзы, капля собирает отраженное от поверхности изделия 1 оптическое излучение. И далее направляет его на регистратор 10, в котором окуляр 11 в виде стеклянной линзы освещает ПЗС-матрицу 12, с выдачей цифрового выходного сигнала $N_{рег}$ на вход схемы управления 9.

Режим ВКР зависит от многих факторов, в частности, скорости истечения $v_{стп}$, частоты генератора $f_{мог}$ (с возможным наличием резонансных частот), амплитудой колебаний, вязкости η и др. [7–10].

Регистрация изображения фронтально отраженного от поверхности изделия дает возможность определения шага неровностей поверхности изделия (рис. 1а). Формирование криволинейной траектории движения капельного потока и синхронизация движения его капель относительно элементов изделия позволяет реализовать возможность контроля радиуса режущей кромки при шлифовании режущего инструмента (рис. 1б, 2). Особенности такого режима рассмотрены далее. Кроме того, принципиально возможно также измерение и высоты неровностей при реализации теневого метода или метода светового сечения с использованием подсветки в виде тонкой световой линии или светотеневой границы соответственно (рис. 1в).

2. Оптические и динамические параметры капель управляемых капельных потоков. В разделе рассматривается взаимосвязь между оптическими и динамическими параметрами движущихся капель при визуализации поверхности изделия.

2.1. Фокусное расстояние. В капельных микроскопах используется момент времени совпадения фокуса подлетающей капли с уровнем поверхности изделия для вертикальной (рис. 3а) и боковой (рис. 3б) регистраций изображения, т.е. при нахож-

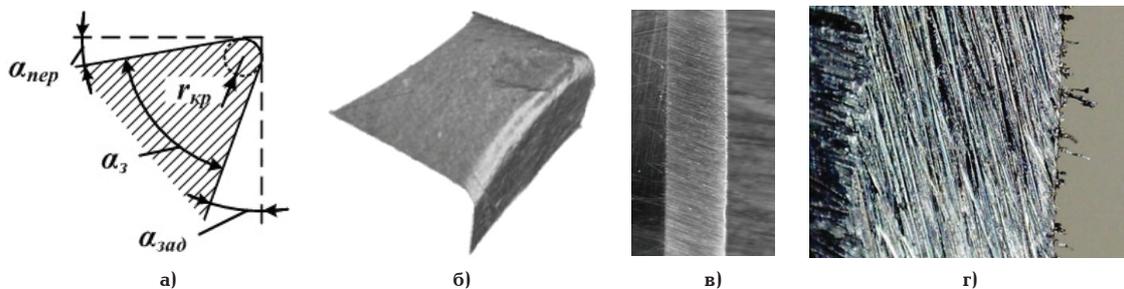


Рис. 2. Кромки режущего инструмента (а) и ее визуализация (б), (в) и (г)

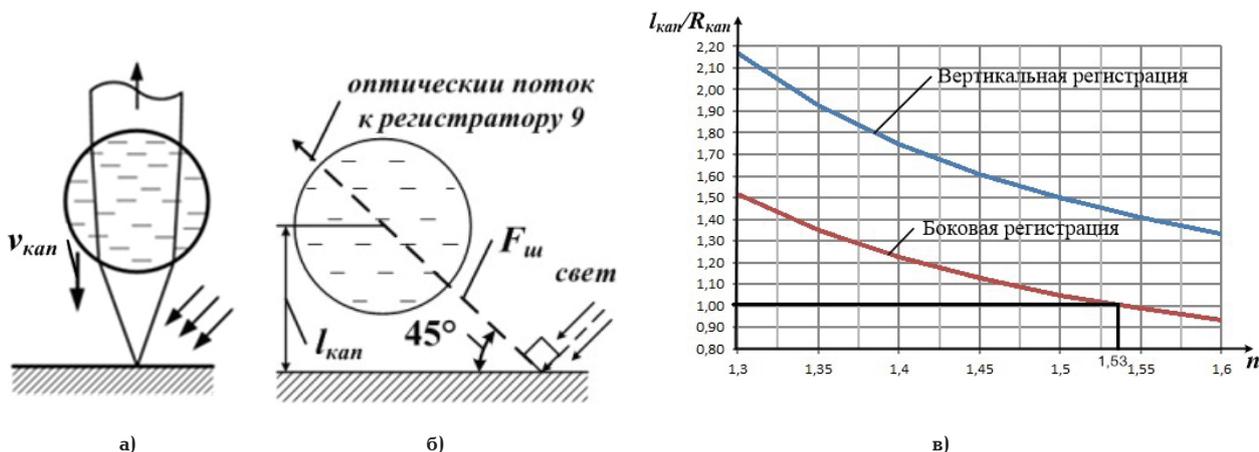


Рис. 3. Оптические схемы в процессе измерения неровности поверхности изделия: при вертикальной регистрации (а), при боковой регистрации освещении (б), зависимость коэффициента $\frac{I_{kap}}{R_{kap}}$ от показателя преломления n (в)

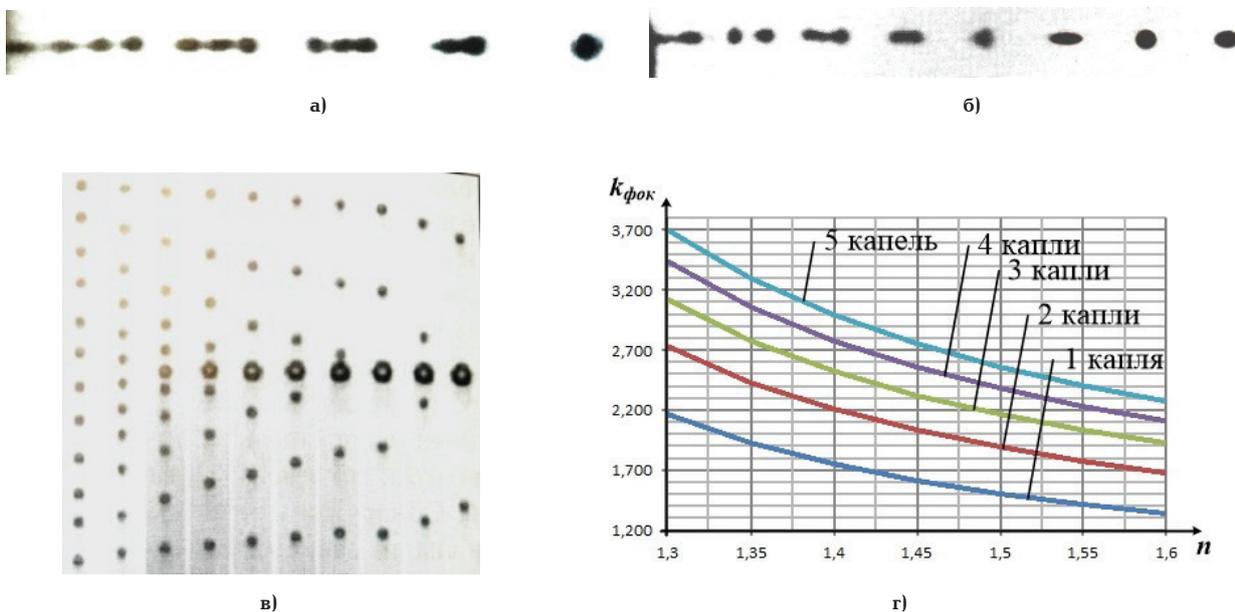


Рис. 4. Фото движения капель при их слиянии: по две (а), по три (б), 12 капель в одну большую (в) и зависимости $K_{фок}$ от показателя преломления n для капли, созданной из m капель с изменением от 1 до 5 (г)

дени его поверхности на фокусном расстоянии: $I_{kap} = F_{kap}$ и $I_{kap} = 0,7F_{kap}$ соответственно. В первом случае может контролироваться шаг неровностей, а во втором также и их высота при использовании подсветки в виде тонкой световой линии (теневой метод) или светотеневой границы (метод светового сечения).

После преобразования этих равенств получаем $I_{kap} = \frac{0,5R_{kap} \cdot n}{(n-1)}$ [5] и $I_{kap} = \frac{0,35R_{kap} \cdot n}{(n-1)}$. Далее удобнее использовать безразмерное относительное расстояние $\frac{I_{kap}}{R_{kap}}$, записывая оба уравнения в следующем виде: $\frac{I_{kap}}{R_{kap}} = \frac{0,5n}{(n-1)}$ и $\frac{I_{kap}}{R_{kap}} = \frac{0,35n}{(n-1)}$. Для по-

лученных выражений построены два графика, приведенные на рис. 3в. При этом график для боковой регистрации приближен к оси абсцисс и для капельного потока на основе воды ($n=1,33$) зона контроля попадает в фокус капли при ее подлете к поверхности изделия и зазоре, равном $\approx R_{\text{кан}}/2$, для жидкости с $n=1,53$ (жидкость, подобная гвоздичному или кедровому маслам) этот момент соответствует касанию капли с поверхностью изделия, а при $n > 1,53$ — процессу растекания.

2.2. Управление фокусным расстоянием капельного микроскопа. Разрешение капельного микроскопа зависит от фокусного расстояния каплей $F_{\text{кан}}$, связанного с диаметром капли $d_{\text{кан}}$, определяемого для режима ВКР диаметром струи d_{jet} : $d_{\text{drop}} \approx 2d_{\text{jet}}$. Управление $F_{\text{кан}}$ при $d_{\text{кан}} = \text{const}$ возможно при слиянии нескольких капель в одну двумя способами [8]:

— за счет введения специальных модуляционных эффектов ВКР для одной струи и слияния двух (рис. 4а) или трех (рис. 4б) капель в одну;

— за счет соединения нескольких капельных потоков в один, например, как показано на рис. 4в, слияние 12 капель.

Слияние m одинаковых капель с объемом $V_0 = \frac{4}{3}\pi R_0^3$ формирует новообразованную каплю с объемом $V_{\text{нов}} = \frac{4}{3}\pi R_{\text{нов}}^3$, при условии: $mV_0 = V_{\text{нов}}$. С учетом этого имеем $\frac{4m}{3}\pi R_0^3 = \frac{4}{3}\pi R_{\text{нов}}^3$, откуда после упрощения получаем $R_{\text{нов}} = \sqrt[3]{m}R_0$, и для относительного радиуса $R_{\text{отн}} = \frac{R_{\text{нов}}}{R_0}$ можно записать

$$R_{\text{отн}} = \frac{R_{\text{нов}}}{R_0} = \sqrt[3]{m}. \quad (1)$$

Тогда выражение для фокусного расстояния новообразованной капли $F_{\text{нов}}$ в зависи-

мости от количества исходных капель примет вид $F_{\text{нов}} = \frac{R_{\text{нов}} \cdot n}{2(n-1)} = \frac{\sqrt[3]{m} \cdot R_0 \cdot n}{2(n-1)}$. Из этой формулы можно записать выражение для относительного (удельного) фокусного расстояния $k_{\text{фок}} = \frac{F_{\text{нов}}}{R_0} = \frac{\sqrt[3]{m} \cdot n}{2(n-1)}$ и построить графики зависимости от показателя преломления n для различного количества соединяемых капель m в пределах от 1 до 5 (рис. 4г).

2.3. Передачи изображения одиночной каплей. Для понимания особенностей и возникающих ограничений при реальной передаче изображения сферическими одиночными и упавшими на поверхность изделия каплями было поставлено несколько натуральных экспериментов (рис. 5). На рис. 5а — в показаны стеклянный шар диаметром 16 мм, сферическая стеклянная ваза диаметром ≈ 110 мм, капля диаметром $\approx 2,2$ мм соответственно. Результат имитации передачи изображения через оптическую систему, состоящую из капли с линзой, продемонстрирован на рис. 5г, д. Из этих фотографий видно, что использование сферических элементов или капель принципиально не ухудшает качество передаваемого изображения, за исключением появляющихся искажений в виде дисторсии по мере удаления от центра.

Помимо этого важно понимать особенности передачи изображения растекающейся каплей. Так, из-за существенной кривизны формы динамично растекающейся капли очень трудно подобрать соответствующий угол бокового освещения. Для худшего варианта могут возникать многочисленные переотражения, существенно ухудшающие возможность качественной передачи изображения (рис. 6). В связи с этим более перспективно использовать диффузно рассеянный свет с широкой диаграммой направленности, формируемый, например,

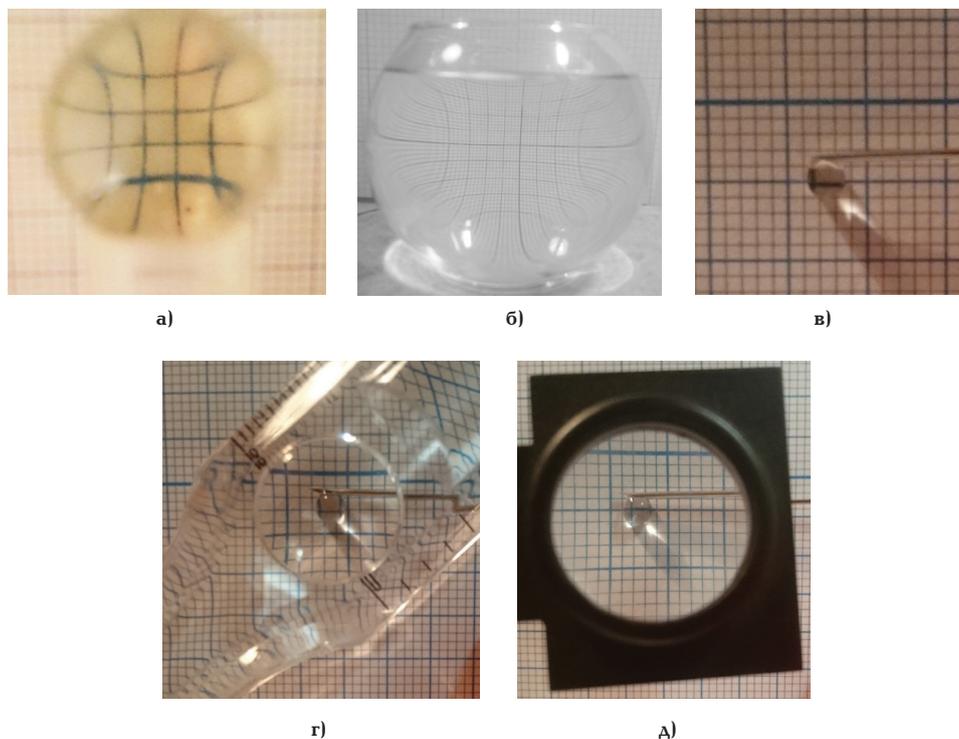


Рис. 5. Имитация передачи изображения клеток миллиметровой бумаги одиночными каплями: стеклянного шара $\varnothing=16$ мм (а), шаровидной вазы, наполненной водой (б), одиночной капли (в), оптической системой, состоящей из капли с линзой (г, д)

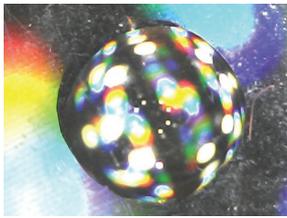


Рис. 6. Многочисленные переотражения света в упавшей капле

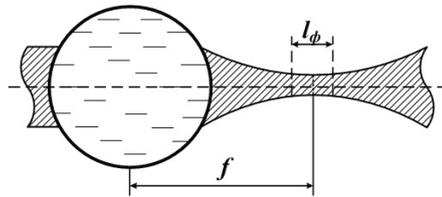


Рис. 7. Фокус и фокальный параметр капли

при прохождении света через матовую поверхность (в проходящем свете) или при отражении от шероховатой поверхности (в отраженном свете).

2.4. *Аэродинамическое сопротивление движущейся капле. Движение капли при сканировании изделия.* При регистрации изображения движущихся изделий сложных форм необходимо учитывать возникающие воздушные потоки, создающие силу аэродинамического сопротивления $F_{aэp}$ при полете капли. Так, при полете одиночной капли в неограниченном пространстве [9] $F_{aэp} = 3\pi\rho_v\gamma_v v_k d_k \left(1 + \frac{1}{6} \left(\frac{v_k d_k}{\gamma_v}\right)^{2/3}\right)$, где ρ_v, γ_v — плотность и кинематическая вязкость воз-

духа, v_k — скорость капли. При полете «цепочки» капель для расчета силы аэродинамического сопротивления $F_{aэp}$ используются дополнительные поправочные коэффициенты, учитывающие влияние соответственно ведущей и ведомой капель [9].

Однако расчеты значений $F_{aэp}$ могут быть существенно скорректированы при сонаправленном движении капли со скоростью, близкой к движению изделия.

Скорость движения поверхности изделия записывается $v_{изг} = 2\pi r_{изг} \cdot N$, где N — число оборотов в секунду вращающегося изделия. Скорость движения капли определяется формулой [7]: $v_{кап} = v_{cmp} \left[1 - \frac{2\sigma}{\rho \cdot r_{cmp} \cdot v_{cmp}^2}\right]$, где σ и ρ — поверхностное натяжение и плотность жидкости. На основании уравнения Бернулли, пренебрегая потерями энергии при вытекании жидкости, выражение для скорости жидкости v_{cmp} зависит от создаваемого избыточного давления P_x и плотности жидкости ρ : $v_{cmp} = \sqrt{\frac{2P_x}{\rho}}$. Тогда с учетом вышеприведенных уравнений можно записать формулу для разностной скорости между движущейся каплей и поверхностью изделия

$$\Delta v = v_{изг} - v_{кап} = 2\pi r_{изг} \cdot N - v_{cmp} \left[1 - \frac{2\sigma}{\rho \cdot r_{cmp} \cdot v_{cmp}^2}\right]. \quad (2)$$

При $\Delta v = 0$ осуществляется регистрация «статического» изображения, а два других случая $\Delta v \leq 0$ и $\Delta v \geq 0$ соответствуют сканированию «вперед» или «назад». При этом сила аэродинамического сопротивления $F_{aэp}$ будет нулевой или иметь малые значения, которыми можно пренебречь.

2.5. *Определение динамических характеристик при регистрации изображений движущейся каплей.* Известно, что фокальный параметр l_ϕ соответствует расстоянию между плоскостями, расположенными симметрично относительно фокуса f , на которых площадь поперечного сечения сфокусированного

пучка вдвое превышает площадь фокальной перетяжки (рис. 7). Перетяжка пучка соответствует координате, в которой кривизна волнового фронта пучка обращается в ноль. При этом принято, что её положение с высокой точностью соответствует фокусу. Значение l_ϕ определяется выражением $l_\phi = \frac{2F_k^2}{k \cdot r_0^2 \cdot 2\pi}$, где k — коэффициент, определяемый как $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ и для $\lambda = 0,63$ мкм, равный $\approx 1,3 \cdot 10^7$.

Радиус фокального пятна r_ϕ определяется формулой $r_\phi = \frac{F_k}{k \cdot r_0}$, определяя поле обзора в контролируемом изделии.

Рассчитаем значение l_ϕ при $r_0 = 125$ мкм, диаметре капли $d_{кап} = 250$ мкм для воды ($n = 1,33$) с использованием формул из раздела 2.2 для фокусного расстояния $F_{кап} : F_{кап} = \frac{0,5 \cdot 250 \cdot 10^{-6} \cdot 1,33}{0,33} \approx 504$

мкм. С учетом этого получим значение $l_\phi : l_\phi = \frac{2 \cdot (504 \cdot 10^{-6})^2}{1,3 \cdot 10^7 \cdot (125 \cdot 10^{-6})^2} \approx 2,5$ мкм и, соответственно, максимальную скорость движения поверхности

изделия $v_{max} = \frac{l_a}{t_{per}}$, где t_{per} — время регистрации кадра видеоизображения. Если принять для современных быстродействующих видеокамер $t_{per} \approx 1$ мкс, то $v_{max} = 2,5$ м/с. И для изделия с радиусом $r_{изг} = 30$ мм число оборотов $N \approx 13,2$ м/с ≈ 800 об/мин. Таким образом, как видно, рассчитанные значения соответствуют параметрам современных станков и не ухудшают их динамические характеристики.

3. *Расчет погрешности позиционирования капли.* Погрешность позиционирования капли можно определить на основе соотношений, связывающих электрические, конструктивные и гидродинамические параметры отклоняющего узла электрокапельного устройства без учета сил аэродинамического сопротивления движению капли [10]. Итак, для плоскопараллельных отклоняющих пластин при условии пренебрежения влиянием поля заряженной капли на E можно записать $E = \frac{U_0}{h_0}$, где h_0 — расстояние между отклоняющими пластинами; U_0 — напряжение на отклоняющих пластинах. С учетом этого формулу можно для отклонения капли l_y записать в следующем виде [10]:

$$l_y = \frac{U_0 \cdot l_0 \cdot (2l_n - l_0) \cdot q_k}{2 \cdot m_k \cdot h_0 \cdot v_k^2}, \quad (3)$$

где q_k, m_k, v_k — заряд, масса и скорость капли, l_n — длина отклоняющих пластин, l_0 — расстояние от входного среза отклоняющих пластин до поверхности контролируемого изделия. Масса капли m_k пропорциональна ее шаровидному объему V_k и плотности жидкости ρ $m_k = \rho \cdot V_k = \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d_k}{2}\right)^3 = \frac{\pi \cdot \rho \cdot d_k^3}{6}$.

Для метрологического анализа можно упрощенно принять, что $v_k \approx v_{cmp} = \sqrt{\frac{2P_{ж}}{\rho}}$, и тогда с учетом $d_{кап} \approx 2d_{cmp} \approx 2d_c$ (d_c — диаметр сопла) уравнение (3) примет вид

$$l_y = \frac{3U_0 \cdot l_0 \cdot (2l_n - l_0) \cdot q_k}{4\pi \cdot d_c^3 \cdot h_0 \cdot P_{ж}} = \frac{3U_0 \cdot l_0 \cdot l_3 \cdot q_k}{4\pi \cdot d_c^3 \cdot h_0 \cdot P_{ж}}, \quad (4)$$

где l_3 — расстояние зазора, определяемое по формуле $(2l_n - l_0)$.

Для определения погрешности δl_y применим для выражения (4) логарифмический метод, последовательно логарифмируя его $\ln l_y = \ln 3 + \ln U_0 + \ln l_0 + \ln l_3 + \ln q_k - \ln 4 - \ln \pi - 3 \ln d_c - \ln h_0 - \ln P_{ж}$, а затем дифференцируя $\frac{dl_y}{l_y} = 0 + \frac{dU_0}{U_0} + \frac{dl_0}{l_0} + \frac{dl_3}{l_3} + \frac{dq_k}{q_k} - 0 - 0 - 3 \frac{dd_c}{d_c} - \frac{dh_0}{h_0} - \frac{dP_{ж}}{P_{ж}}$. И после замены знака «d» на знак «Δ» и знаков «минус» на «плюс» получим $\frac{\Delta l_y}{l_y} = \frac{\Delta U_0}{U_0} + \frac{\Delta l_0}{l_0} + \frac{\Delta l_3}{l_3} + \frac{\Delta q_k}{q_k} - 3 \frac{\Delta d_c}{d_c} - \frac{\Delta h_0}{h_0} - \frac{\Delta P_{ж}}{P_{ж}}$. С учетом того, что погрешности всех параметров независимы и имеют закон нормального (Гаусса) распределения, в более строгой форме выражение для относительной погрешности записывается

$$\delta l_y = \sqrt{(\delta U_0)^2 + (\delta l_0)^2 + (\delta l_3)^2 + (\delta q_k)^2 + (3\delta d_c)^2 + (\delta h_0)^2 + (\delta P_{ж})^2}. \quad (5)$$

Проведем расчет значения δl_y . Погрешности отклоняющего напряжения δU_0 и заряда капли δq_k (зависящей от стабильности напряжения зарядки) близки по своей природе и определяются погрешностями формирования соответствующих напряжений, например, при использовании цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Для современного уровня развития электроники погрешность линейности для 14-разрядного ЦАП AD9764 не более 0,01 % [11].

Погрешности δl_0 , δl_3 , δd_c и δh_0 связаны с размерными параметрами СКОИС и ее расположения на станке и можно считать их пренебрежимо малыми, при условии проведения предварительной калибровки перед измерениями.

Согласно [12], к началу 2001 г. значение $\delta P_{ж}$ определяемое уровнем пульсаций давления, не превышало 1 %. С учетом прогресса за прошедшие почти 20 лет для лучших импортных калибраторов давления значение $\delta P_{ж}$ не превосходит 0,05 % [13] и даже 0,005 % [14].

И тогда, с учетом вышесказанного, для двух значений $\delta P_{ж} = 0,05$ % и $\delta P_{ж} = 0,005$ % соответственно имеем $\delta l_y = \sqrt{0,01^2 + 0,01^2 + 0,05^2} \approx 0,05$ % и $\delta l_y = \sqrt{0,01^2 + 0,01^2 + 0,005^2} \approx 0,015$ %.

Абсолютное значение погрешности позиционирования капли Δl_y для значения $l_y = 1$ см, рассчитанное как $\Delta l_y = \delta l_y \cdot l_y$, составит 5 мкм и 1,5 мкм соответственно.

Полученные значения соответствуют управлению траекторией движения капельного потока по одной оси.

Для двухосевого управления значение погрешности с учетом алгебраического суммирования по двум осям составит в $\sqrt{2}$ раз больше, а именно 7 мкм и $\approx 2,1$ мкм.

Заключение.

1. Формирование движущегося капельного потока с управляемой траекторией движения позволя-

ет реализовать визуализацию поверхности обрабатываемого изделия с контролем ее шероховатости и частично радиуса кромки (для режущего инструмента).

2. Введение специальных модуляционных эффектов ВКР для одной струи или соединение нескольких капельных потоков в один позволяет обеспечить слияние нескольких капель в одну с соответствующим изменением радиуса и фокусного расстояния.

3. Погрешность позиционирования капли при одно- и двухосевом управлении траектории движения капельного потока при стабилизации давления жидкости для современного уровня развития технологий может достигать 1,5 мкм и $\approx 2,1$ мкм соответственно.

Библиографический список

1. Леун Е. В. Гидроструйный интерферометрический способ контроля размеров изделий // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 4. С. 101–109.
2. Пат. 2612349 Российская Федерация, МПК G 01 B 11/02. Струйный способ контроля линейных размеров изделий / Леун Е. В.; заявл. 23.10.15; опубл. 07.03.17, Бюл. № 7.
3. Леун Е. В. Интеллектуальный токарный резец с приборами активного контроля температуры зоны резания, размеров изделия и параметров формы его поверхности // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 87–93.
4. Леун Е. В. Электрокапеструйный микроскоп для активного контроля неровностей поверхности изделия // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 4. С. 39–47. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-4-39-47.
5. Леун Е. В. Вопросы построения струйно-капельных оптических измерительных систем: принципы и режимы работы, возможности и основные характеристики // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 189–195. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-189-195.
6. Леун Е. В. Вопросы построения струйно-капельных оптических измерительных систем: регистрация сигналов акустической эмиссии и измерение температуры в зоне резания при точении, сверлении и фрезеровании // Омский научный вестник. 2019. № 1 (163). С. 55–61. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-55-61.
7. Бухаров А. В. Теплофизические проблемы получения стабильных капельных потоков с минимальным разбросом по скорости и размерам капель: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2016. 390 с.
8. Аметистов Е. В., Дмитриев А. С. Монодисперсные системы и технологии: моногр. М.: МЭИ, 2002. 390 с. ISBN 5-7046-0875-2.
9. Безруков В. И. Научно-технические основы и аппаратное обеспечение автоматизированной электрокапеструйной маркировки изделий: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2003. 563 с.
10. Левченко Ю. А. Управляемый метод электрокапеструйного нанесения технологических жидкостей на химические нити: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 194 с.
11. Цифроаналоговые преобразователи. URL: http://pnu.edu.ru/media/filer_public/2013/01/31/lieu-cap.pdf (дата обращения: 04.11.2019).
12. Пат. 2197717 Российская Федерация, МПК G 01 D 15/16, В 41 J 2/04, В 41 J 2/185. Гидросистема электрокапеструйного принтера и ловушка неиспользованных капель для гидросистемы электрокапеструйного принтера / Безруков В. И., Спиридонов В. Д.; заявл. 29.12.00; опубл. 27.01.03, Бюл. № 3.
13. Калибратор давления Модель СРН6000. URL: https://www.wika.ru/upload/DS_CT1501_ru_ru_1072.pdf (дата обращения: 04.11.2019).
14. Высокоточный калибратор высокого давления. Модель CPC8000-H. URL: https://www.wika.ru/cpc8000_h_ru_ru.WIKA?

ProductGroup=73674&177=819&178=822 (дата обращения: 04.11.2019).

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

ВАРЕПО Лариса Григорьевна, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4980-6679

AuthorID (РИНЦ): 657039

ORCID: 0000-0001-5366-2700

AuthorID (SCOPUS): 6507043152

ResearcherID: B-1163-2015

ШАХАНОВ Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, начальник отдела АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

SPIN-код: 2918-9632

AuthorID (РИНЦ): 916667

НИКЕЛЬ Андрей Викторович, инженер, участок ТЧЭ № 2, ОАО «РЖД», Западно-Сибирская железная дорога, г. Омск.

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В., Варепо Л. Г., Шаханов А. Е., Никель А. В. К вопросам построения струйно-капельных оптических измерительных систем: анализ оптических, динамических и метрологических параметров при визуализации поверхности обрабатываемого изделия // Омский научный вестник. 2019. № 6 (168). С. 89–95. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-89-95.

Статья поступила в редакцию 05.11.2019 г.

© Е. В. Леун, Л. Г. Варепо, А. Е. Шаханов, А. В. Никель