

## ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ: РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ, СВЕРЛЕНИИ И ФРЕЗЕРОВАНИИ

В статье рассматриваются вопросы использования на металлорежущих станках струйно-капельных оптических измерительных систем (СКОИС) для регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) и пирометрического измерения температуры в зоне резания. Работа СКОИС рассмотрена на примерах металлообработки с подачей к зоне резания смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), направленной струей или через внутренние сквозные отверстия режущего инструмента.

Показано, что гидросток СОЖ используется для направленной передачи из зоны резания АЭ сигналов к гидрофону как звукопровод и оптического излучения инфракрасного диапазона к пирометру как световод. В первом случае АЭ сигналы регистрируются для контроля режимов металлообработки в зоне резания, а во втором — измеряется ее температура.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, гидрофон, пирометр, световод, звукопровод, зона резания, режущий инструмент.

**Введение.** За последнее время появились работы по струйно-капельным оптическим измерительным системам (СКОИС) для контроля размеров изделий и параметров их поверхностей [1–6]. Расширение области применения СКОИС возможно за счет использования на металлорежущих станках для регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) и измерения температуры в зоне резания при подаче к ней смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) направленной струей или подводом через внутренние сквозные отверстия инструмента (рис. 1).

В наши дни для передачи оптического сигнала и в составе датчиков все чаще применяют волоконные световоды, отличающиеся малыми массой и размерами, высокими чувствительностью и защищенностью от внешних электрических помех, характерных для металлорежущих станков.

Их успешное применение при контроле вышеуказанных параметров позволяет более объективно судить о проходящих процессах в зоне резания.

Вопросы построения СКОИС для измерений этих параметров при точении, сверлении и фрезеровании, находясь на стыке таких на-

правлений, как резание материалов, методы акустической эмиссии, волоконно-оптическая техника, пирометрия, гидроакустика, вынужденный капиллярный распад струй, являются актуальными. В открытой печати подобных междисциплинарных исследований ранее представлено не было, и данная статья, рассматривая эти вопросы на примерах регистрации АЭ сигналов и измерения температуры в зонах резания токарного резца и сверла, направлена на восполнение этого недостатка.

**1. Технологические особенности при регистрации АЭ сигналов и измерения температуры зоны резания на металлорежущих станках.** Для повышения точности измерений можно сформировать перечень требований, условий и ограничений, характерных для средств регистрации сигналов АЭ и измерения температуры:

1) в соответствии с исследованиями в области металлообработки [7–9] наиболее важными для контроля зоны резания являются диапазон температур 500–1000 °С и погрешность измерения не хуже 10 °С, т.е.  $\leq 1\%$ ;

2) априорно неизвестная и/или переменная излучательная способность материалов элементов, контактирующих в зоне резания;

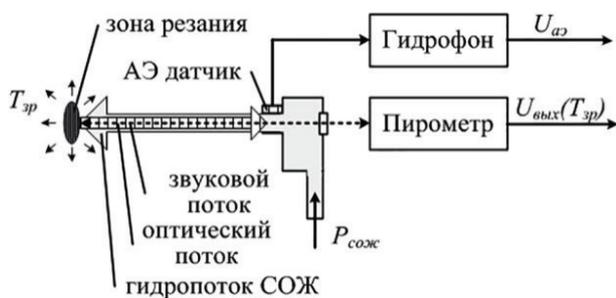
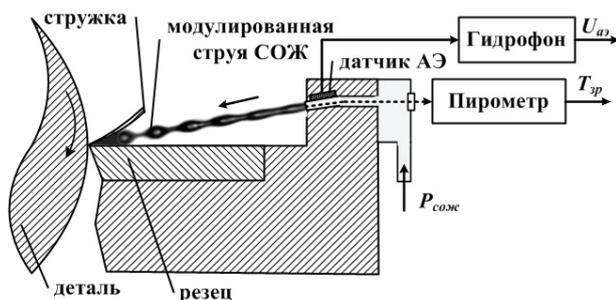


Рис. 1. Структурная схема СКОИС при регистрации АЭ сигналов и пирометрическим измерением температуры



а)



б)

Рис. 2. Регистрация АЭ сигнала и измерение температуры при точении (а) и форма модулированной струи СОЖ при подаче в зону резания с образованием утолщений, перешейков и не оторвавшейся от струи капли (б)

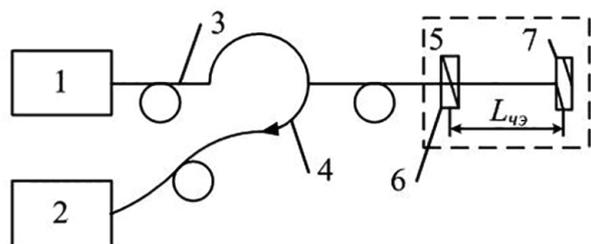


Рис. 3. Принципиальная схема волоконно-оптического датчика АЭ на основе импульсного интерферометра Фабри-Перо

3) обеспечение максимально широкой диаграммы направленности оптического канала для передачи теплового (в дальнейшем по тексту — ИК излучения) от зоны резания к пирометру;

4) пьезоэлектрические преобразователи традиционно используемые [10–12] для регистрации АЭ сигналов из-за нелинейности АЧХ от собственного резонанса и резонанса, определяемого конструкцией резца, его крепежной оснастки и т.п. вносят искажения при регистрации широкополосных АЭ сигналов. Кроме того, несмотря на то, что по акустическому сопротивлению металлы почти в 30 раз превосходят жидкости, однако при их нагреве до 700–1000 °С снижение плотности и, соответственно, акустического сопротивления может достигать 20–25 %. Все это обуславливает поиск альтернативных вариантов регистрации АЭ сигналов, например, за счет совместного применения направленной струи СОЖ в качестве звукопровода для передачи АЭ сигналов вместе с широкополосным волоконно-оптическим датчиком (ВОД) в составе гидрофона, осуществляющего их регистрацию. Для понимания потенциала такого варианта далее сделана оценка ожидаемых технических характеристик.

**2. Регистрация АЭ сигналов и активный контроль температуры зоны резания с помощью СКОИС при точении.** При точении зона резания может разогреваться  $\approx$  до 1000 °С, формируя АЭ сигналы, связанные с особенностями металлообработки. Струя СОЖ, подаваемая в зону резания [4], помимо облегчения условий контактирования в ней за счет смазки и охлаждения, может выполнять роль звукопровода и световода, способных доставлять от зоны резания АЭ сигналы и ИК излучение к АЭ датчику с гидрофоном и пирометру соответственно (рис. 2а).

Модулирование струи СОЖ приводит к появлению на ней последовательности из движущихся нарастающих по амплитуде утолщений и перешейков с периодическим формированием на конце струи неотрвавшейся капли. Капля, близкая по форме к шару, на конце струи, вливаясь в слой СОЖ при зоне резания и обладая максимальной диаграммой направленности для света и звука, вводит их в струю СОЖ и направляет их в зоны резания для регистрации и измерения. Особенности регистрации АЭ сигналов и измерения температуры с помощью струи СОЖ рассмотрены далее.

**2.1. Регистрация АЭ сигналов с помощью струи СОЖ в качестве звукопровода при точении.** Жидкости давно используются в качестве звукопровода для передачи акустических сигналов для акустооптической модуляции света, регистрации утечек в трубопроводах с жидкостью [13], гидрофонии подводных аппаратов и при исследовании поведения зубатых китов и дельфинов. Современные устройства для регистрации АЭ сигналов, созданные на основе ВОД, можно условно разделить на две группы:

1) ВОД на основе интерферометров Фабри-Перо, в т.ч. с использованием волоконных брэгговских решеток в сочетании со специальными методами модуляции/демодуляции сигналов [14–16];

2) ВОД с повышенной акустической чувствительностью АЭ сигналов [17, 18].

ВОД из первой группы собран на основе импульсного интерферометра Фабри – Перо (рис. 3) и включает источник излучения 1, фотоприемник 2, оптические волокна 3, оптический циркулятор 4, чувствительный элемент 5, первое 6 и второе 7 полупрозрачные зеркала. Согласно экспериментальным исследованиям [15], чувствительный элемент 5 из волокна имел длину 7 мм с возможностью регистрации АЭ сигналов в диапазоне от 10 до 210 кГц был установлен продольно на композитную графит-эпоксидную (Gr/Ep) пластину при имитационном эксперименте падения стального шарика диаметром 6 мм на нее.

Повышение акустической чувствительности для ВОД из второй группы более чем на 6 дБ были достигнуты за счет использования специального микроструктурированного волоконного световода с кварцевой сердцевиной, используемого в составе волоконного интерферометра Майкельсона с волоконным ответвителем и фарадеевскими зеркалами [17]. Данные частотного диапазона для данных исследований отсутствуют.

**2.1.1. Оценка чувствительности при регистрации АЭ сигналов.** Оценка чувствительности путем использования отношения сигнал/шум для направленной струи СОЖ произведена при использовании результатом экспериментальных исследований, представленных в [16]. Источником АЭ сигнала в них было падение стального шарика диаметром 6 мм с высоты 50 мм на пластину из графит-эпоксидного материала [16]. Эмпирически можно принять этот уровень сигнала АЭ равным уровню, формируемому при точении, сверлении и фрезеровании.

Допустимым уровнем при регистрации АЭ сигнала ВОД является 10дБ, а экспериментально в [16] для поверхностного расположения ВОД было получено 21 дБ. В соответствии с этим можно записать  $10\text{дБ} = 21\text{дБ} - 20\lg \frac{R_{\text{гэм}}}{R_{\text{смп}}}$  и после упрощения получить  $\lg \frac{R_{\text{гэм}}}{R_{\text{смп}}} = 0,55$ , где  $R_{\text{гэм}}$  и  $R_{\text{смп}}$  —

акустические сопротивления канала звукопровода графит-эпоксидного материала и струи СОЖ. Значения  $R_{\text{гэм}}$  и  $R_{\text{смп}}$  пропорциональны площадям сечения  $S_{\text{гэм}}$ ,  $S_{\text{смп}}$  и удельного акустического сопротивления графит-эпоксидного материала и струи СОЖ  $R'_{\text{гэм}}$  и  $R'_{\text{смп}}$ :  $R_{\text{гэм}} = R'_{\text{гэм}} \cdot S_{\text{гэм}}$  и  $R_{\text{смп}} = R'_{\text{смп}} \cdot S_{\text{смп}} = R'_{\text{смп}} \cdot \pi r_{\text{смп}}^2$ .

Сечение чувствительного элемента ВОД, согласно фотографии из [16], с небольшим запасом  $S_{\text{гэм}} \approx 0,5 \times 0,5 \text{ мм} = 0,25 \text{ мм}^2 = 0,0025 \text{ см}^2$ . Удельное акустическое сопротивление графит-эпоксидного материала должно быть не хуже мрамора [19], у которого  $R'_{\text{гэм}} \approx 10 \cdot 10^5 \frac{\Gamma}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ , а для СОЖ, как правило, изготавливаемого на масляной основе, можно принять  $R'_{\text{смп}} \approx 1,5 \cdot 10^5 \frac{\Gamma}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$  [20].

С учетом вышеприведенного, минимальный радиус струи СОЖ определится выражением  $r_{\text{смп}} = \sqrt{\frac{0,0025 \cdot 10 \cdot 10^5}{10^{0,55} \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^5}} \approx \sqrt{\frac{0,025 \cdot 10^5}{3,55 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^5}} \approx 0,38$ , и, соответственно,

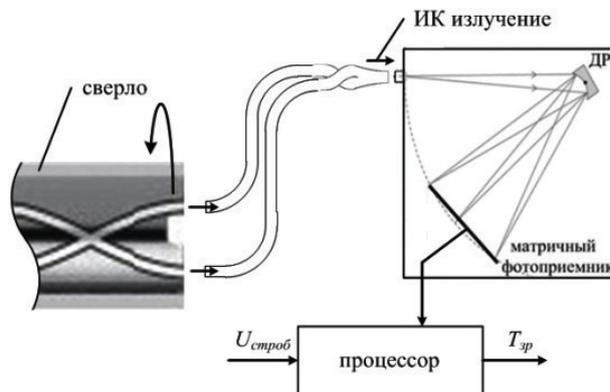


Рис. 4. Схема спектрального пирометра

минимальный диаметр струи СОЖ составит  $d_{\text{смп}} \approx 0,76 \text{ мм}$ . Полученное значение свидетельствует о том, что чувствительность ВОД при регистрации АЭ сигналов достаточно высока и позволяет сформировать полезный сигнал, превосходящий уровень помех и шумов на 10 дБ при использовании струи СОЖ в качестве звукопровода при точении.

**2.2. Измерение температуры зоны резания.** При измерении температуры зоны резания во время металлообработки струя СОЖ используется как световод для доставки ИК излучения к пирометру. При этом нагретые поверхности контактирующих между собой резца, заготовки и стружки и взаимодействующих с СОЖ имеют, как правило, априорно неизвестную и/или переменную излучательную способность. Наиболее перспективные пирометры, работающие с этими ограничениями, группируются вокруг двух направлений:

- 1) спектральная пирометрия [21 – 23];
- 2) активно-пассивная пирометрия [24, 25].

Возможность применения представителей этих направлений для измерения температуры зоны резания рассмотрены далее.

### 2.2.1. Спектральная пирометрия.

В основе семейства методов спектральной пирометрии лежит формирование диспергирующим элементом (дифракционной решеткой) пространственной развертки спектра ИК потока, излучаемого контролируемым телом, с регистрацией его матричным фотоприемником и последующей обработкой (рис. 4). Так, бихроматический способ, реализованный на основе метода спектральных отношений, состоит из двух этапов, а значение температуры вычисляется по формуле [22, 23]:

$$T_{jk} = \frac{c_2}{\Lambda} (\ln \Phi_j - \ln \Phi_k), \quad (1)$$

где  $\Lambda = \frac{\lambda_j \lambda_k}{\lambda_k - \lambda_j}$  — эффективная длина волны метода спектральных отношений,  $c_2$  — вторая пирометрическая константа, равная  $\frac{hc}{k} = 1,4388 \cdot 10^2 \text{ м/К}$ ,  $\Phi(\lambda, T) = \frac{n_k^0(\lambda, T)}{2\pi c \lambda^4}$  — нормированные значения плотности потока фотонов, испускаемых поверхностью исследуемого объекта;  $T_{jk}$  — значение

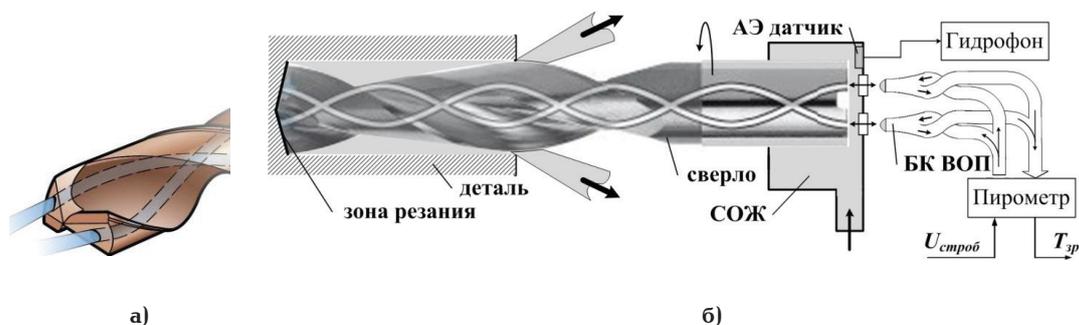


Рис. 5. Сверло с внутренним подводом СОЖ (а), регистрация АЭ сигналов и измерение температуры в зоне резания сверла с внутренним подводом СОЖ при сверлении глубоких отверстий (б)

температуры, вычисляемое по двум спектральным составляющим при длинах волн  $\lambda_j$  и  $\lambda_k$ .

На первом этапе в рабочей области для каждого из числа возможных сочетаний интенсивностей при длинах волн  $\lambda_j$  и  $\lambda_k$  по формуле (1) рассчитывается температура спектрального отношения  $T_{jk}$  с построением температурной гистограммы и аппроксимацией ее нормальным распределением Гаусса. Значение математического ожидания полученной гистограммы соответствует наиболее вероятному значению термодинамической температуры.

На втором этапе уменьшается случайная составляющая погрешности за счет разбиения массива интенсивностей на подгруппы с близкими значениями эквивалентной длины волны с формированием температурных гистограмм и нахождением наиболее вероятного значения температуры. По этим значениям температур каждой подгруппы определяется среднее значение наиболее вероятной температуры, принимаемое за искомое значение температуры.

Использование современных матричных приемников с дифракционными решетками позволяет увеличить до  $5 \cdot 10^6$  число возможных сочетаний  $\lambda_j$  и  $\lambda_k$  при их попарном переборе по формуле (1), а также повысить чувствительность до уровня, близкого к теоретическому пределу, и частоту опроса до  $\approx 0,5 - 1,0$  кГц. Повышенные точности измерения может быть достигнуто за счет синхронизации циклического режима измерения и обработки процессором зарегистрированного спектра по сигналу  $U_{строб}$  в случае образования стружки надлома, обеспечивающей периодический выход ИК излучения из области зоны резания с максимальной температурой.

**2.2.2. Активно-пассивная пирометрия.** В соответствии с законом сохранения энергии и законом Кирхгофа, излучательная способность  $\varepsilon(T, \lambda)$  непрозрачного объекта, находящегося в состоянии термодинамического равновесия, связана с отражательной способностью  $p(T, \lambda)$  выражением  $\varepsilon(T, \lambda) = 1 - p(T, \lambda)$ . С учетом того, что съем материала при металлообработке осуществляется медленно, и принимая, что заготовка находится в состоянии термодинамического равновесия, это уравнение связывает коэффициенты отражения и излучения как для спектральных, так и для интегральных величин. И оно взято за основу для метода активно-пассивной пирометрии, основанного на использовании подсветки широкополосным шумовым излучением с возможностью контроля излучательной способности и физической температуры объекта в широком диапазоне измеряемых температур в режиме реального времени [24].

В процессе измерения определяются излучательная способность и физическая температура объекта. Разработанная методика позволяет контролировать излучательную способность объекта и его физическую температуру в режиме реального времени. Таким образом, данная схема работы радиометра позволяет определить излучательную способность и поверхностную физическую температуру объекта.

**3. Регистрация АЭ сигналов и измерение температуры зон резания при сверлении и фрезеровании.** Близость процессов сверления и фрезерования обуславливает также и общий недостаток, выраженный почти полной недоступностью для внешнего обзора зоны резания из-за ее погруженности от поверхности материала и особенно проявленного в сверлении глубоких отверстий. Единственными каналами, делающими зону резания доступной, являются сквозные внутренние отверстия для подвода СОЖ (рис. 5а). Поэтому в дальнейшем контроль вышеуказанных параметров будет рассмотрен на самом сложном примере сверления глубоких отверстий (рис. 5б).

**3.1. Регистрация АЭ сигналов с подводом СОЖ через внутренние отверстия сверла.** Занимая почти все пространство между зоной резания и датчиком, сверло само является фактически звукопроводом для прохождения АЭ сигналов по маршруту: зона резания  $\rightarrow$  сверло  $\rightarrow$  ВОД (гидрофон). При этом в зависимости от особенностей крепления вращающегося сверла и формирования канала для подвода СОЖ может быть небольшой зазор, заполненный СОЖ, с реализацией другого маршрута: зона резания  $\rightarrow$  сверло  $\rightarrow$  СОЖ  $\rightarrow$  ВОД (гидрофон). В обоих случаях использование ВОД, как показано выше, обеспечит для регистрации АЭ сигналов наилучшую АЧХ.

**3.2. Измерение температуры зоны резания сверл с отверстиями для подвода СОЖ.** Гидропоток СОЖ, протекающий через внутренние отверстия сверла к зоне резания, является фактически т.н. «жидкостным световодом» с внешней металлической оболочкой. При этом спиральная

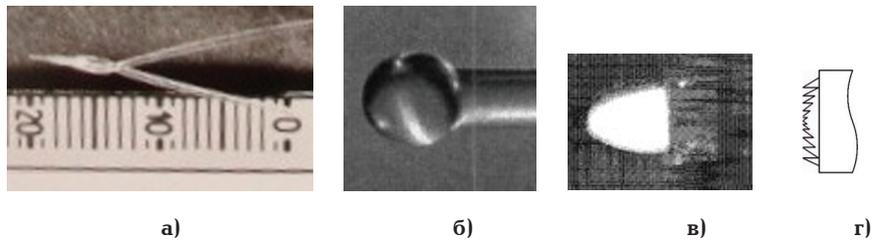


Рис. 6. Общий вид биспирально-конического ВОД (а) и микролинз на его торце: шарообразной (б), параболической (в) и в виде линзы Френеля (г)

закрутка внутренних отверстий позволяет расширить диаграмму направленности для входных и выходных оптических лучей на конце сверла, более полно освещая зону контроля и собирая ИК излучение для доставки к пирометру.

Вращающийся режущий инструмент периодически перекрывает оптический канал с частотой, зависящей от частоты вращения и количества внутренних отверстий и не превышающей, как правило,  $\approx 100 - 300$  Гц. При использовании быстродействующих методов спектральной пирометрии синхронизируемых с вращением режущего инструмента сигналом  $U_{\text{сироб}}$  с частотой опроса до  $\approx 0,5 - 1,0$  кГц подобное перекрытие не приведет к пагубным последствиям.

Как видно, условия для регистрации АЭ сигналов и измерения температуры в зоне резания существующими методами и средствами при сверлении и фрезеровании являются более комфортными, чем при точении.

#### 4. Оптические свойства элементов СКОИС.

Реализуемость обсуждаемых возможностей СКОИС может быть подтверждена оптическими свойствами её оптических элементов, рассмотренных далее.

##### 4.1. Волоконный световод.

Наиболее предпочтительным для применения в пирометрии следует считать световоды на основе халькогенидных стекол на основе элементов Ge, P, As, Sb, S, Se, Te с типичными соединениями: Ge-S, Ge-Se, As-S, As-Se, Ge-S-P, Ge-As-Se, Ge-Se-Te, As-Se-Te, Ge-As-Se-Te и др., обладающими высокой прозрачностью ( $\approx 60 - 70\%$ ) в диапазоне длин волн от  $0,7$  до  $17$  мкм [26, 27].

##### 4.2. Биспирально-конический ВОД.

Биспирально-конический ВОД (рис. 6а) создан на основе Y-образного ответвителя с механическим и оптическим соединением подводящего и отводящего световодов, скрученных друг вокруг друга, и образованием общего световода и витковой части с нанесением сбоку отражающего Al покрытия толщиной  $15 - 50$  мкм. Механические изгибы световодов изменяют траекторию движения лучей (мод) света по нему, что позволяет преобразовать большую часть движущихся по световоду меридиональных лучей света с плоской траекторией движения, проходящей через центральную ось, в сагиттальные со спиральной траекторией движения [28, 29]. Т.е. двигаясь изначально по ровному участку передающего световода равномерно распределенными по сечению, за счет изгибов от закрутки световодов в витковой части траектория движения всех лучей начинает меняться, сме-

щаться от центра сердцевины и все более приобретая спиральную траекторию. В сочетании с использованием микрооптического элемента на торце волокна это позволяет увеличить апертуру световода для входящих и выходящих лучей света и таким образом более полно «освещать и осматривать» ограниченную пространством зону резания в случае ее неоднородного нагрева. Это полезно для струи СОЖ, направляемой в зону резания при точении, а также при подаче света во внутренние каналы сверл или фрез. Температура сварки халькогенидных световодов обычно не более  $300$  °С, делая доступной технологию изготовления таких датчиков.

##### 4.3. Микролинзы и микрооптические элементы.

Минимизация массы и габаритов элементов, сопрягающих оптические потоки между биспирально-коническим ВОД и сквозными каналами сверл или фрез для подвода СОЖ может быть обеспечена при создании микролинз, в т.ч. шаровидной формы, на торцах световодов путем лазерного оплавления [30] (рис. 6б), фотополимеризации жидкого фотополимера на основе органических красителей [31, 32], таких как родамин Б, кумарин 120, метиленовый голубой, и превращения в прозрачное утолщение (рис. 6в), а также использования маски при химическом травлении [33] (рис. 6г).

##### 4.4. Спектр пропускания СОЖ.

Большинство СОЖ производятся на масляной основе, имея гребенчатый спектр пропускания в диапазоне длин волн ИК излучения. Тем не менее это принципиально не препятствует измерению температуры методами спектральной пирометрии и может быть скомпенсировано или минимизировано программным путем при обработке сигнала пространственной развертки. При реализации активно-пассивной пирометрии излучательная способность зоны резания определяется через коэффициент отражения, полученного по величине отраженного сигнала при освещении её шумовым широкополосным излучением. При этом «гребенчатость» спектра пропускания СОЖ войдет одной из составляющих в этот получаемый коэффициент отражения и с учетом возможного проведения предварительных калибровок не будет препятствовать измерению температуры этим методом.

##### Заключение.

1. Применение СКОИС на металлорежущих станках с гидротоком СОЖ позволит регистрировать АЭ сигналы и измерять температуру зоны резания, расширяя собственные функцио-

нальные возможности и составляя альтернативу традиционным методам и средствам контроля вышеуказанных параметров.

2. Применение СКОИС на токарном станке позволяет применять струю СОЖ одновременно в качестве звукопровода и световода для доставки АЭ сигналов и ИК излучения из зоны резания к гидрофону и пирометру соответственно.

3. Совместное использование струи СОЖ как звукопровода и волоконно-оптического датчика для регистрации АЭ сигналов может быть альтернативой с более широкой и ровной АЧХ, чем широко применяемые пьезоэлектрические преобразователи.

4. Модуляция направленной струи СОЖ может использоваться в качестве модулятора звукопровода с периодическим перекрытием излучения на входы сигнального и опорного каналов.

#### Библиографический список

1. 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.
2. Леун Е. В. Гидроструйный интерферометрический способ контроля размеров изделий // Динамика систем, механизмов и машин: материалы X Междунар. IEEE науч.-техн. конф. 2016. № 1, т. 2. С. 101–109.
3. 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. № 9 (69). DOI:10.18698/2308-6033-2017-9-1675.
4. 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.
5. Леун Е. В. Электрокапеструйный микроскоп для активного контроля неровностей поверхности изделия // Динамика систем, механизмов и машин: материалы XII Междунар. IEEE науч.-техн. конф. 2018. Т. 6, № 4. С. 39–47.
6. Леун Е. В. Вопросы построения струйно-капельных оптических измерительных систем: принцип 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.
7. Васин С. А., Верещака А. С., Кушнер В. С. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 448 с.
8. Трусов В. Н., Скуратов Д. Л., Законов О. И., Шикин В. В. Влияние режимов резания на температуру при фрезеровании заготовок из труднообрабатываемых материалов // Авиационная и ракетно-космическая техника. 2011. № 3-1 (27). С. 57–62.
9. Попов А. Ю., Реченко Д. С. Методика расчета температуры в зоне резания при точении // Динамика систем, механизмов и машин. 2012. № 2. С. 291–292.
10. Подураев В. Н., Барзов А. А., Горелов В. А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 1988. 56 с.
11. Фирсов А. М., Вдовин А. В., Перепелкин П. В. [и др.]. Взаимосвязь параметров акустической эмиссии с режимами резания и шероховатостью поверхности при токарной обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 2 (55). С. 70–75.
12. Хвостиков А. С. Диагностика износа режущего инструмента на основе вейвлет-анализа сигнала виброакустической эмиссии: дис. ... канд. техн. наук: Комсомольск-на-Амуре, 2007. 157 с.
13. Овчинников А. Л. Особенности распространения сигналов акустической эмиссии утечек в трубопроводах с жидкостью и аппаратура контроля герметичности: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2006. 170 с.
14. Ефимов М. Е., Волков А. В., Литвинов Е. В. Метод контроля деформаций композитных конструктивных элементов с помощью волоконно-оптического датчика акустической эмиссии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 2. С. 212–219. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-212-219.
15. Ефимов М. Е. Метод и аппаратура для регистрации акустической эмиссии и деформаций композитного графит-эпоксидного материала на основе анализа амплитудно-фазовых характеристик сигнала волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2018. 140 с.
16. Куликов А. В. Волоконно-оптические акустические сенсоры на брэгговских решетках: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 144 с.
17. Туртаев С. Н., Левченко А. Е., Белололов М. И. Акустическая чувствительность микроструктурированного волоконного световода с кварцевой сердцевиной // Фотон-Экспресс. 2013. № 6 (110). Р. 128–129.
18. Белололов М. И., Парамонов В. М., Туртаев С. Н. Распределенные волоконно-оптические системы экспресс-мониторинга. Предельные возможности // Фотон-Экспресс. 2014. № 6 (118). Р. 27–54.
19. Акустические свойства материалов. URL: <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/Sound/SoundAcousticsSpeedImpedanceCeramicsGlassMinerals/> (дата обращения: 18.12.2018).
20. Акустические свойства жидкостей. URL: <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/Sound/SoundAcousticsSpeedImpedanceLiquids/> (дата обращения: 18.12.2018).
21. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012. 248 с. ISBN 978-5-9221-1385-4.
22. Лебедев С. В. Спектральное устройство определения температуры и излучательной способности пирометрируемой поверхности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 172 с.
23. Бесчастный М. А. Спектральный метод и устройство измерения экстремально высоких значений термодинамической температуры при неизвестной излучательной способности пирометрируемой поверхности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 118 с.
24. Никифоров И. А. Инфракрасная радиометрия термически неоднородных объектов с изменяющейся излучательной способностью: дис. ... канд. физ.-мат. Н. Новгород, 2010. 150 с.
25. Захаренко В. А. Инфракрасные и световые средства теплового контроля: разработка, исследование, метрологическое обеспечение и внедрение: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2012. 390 с.
26. Shiryaev V. S., Karaksina E. V., Velmuzhov A. P. [et al.]. Preparation and investigation of  $\text{Ga}_x\text{Ge}_{25}\text{As}_{15}\text{Se}_{60-x}$  ( $x = 1 \div 5$ ) glasses // Optical Materials. 2017. Vol. 67. P. 38–43. DOI: 10.1016/j.optmat.2017.03.024.
27. Shiryaev V. S., Karaksina E. V., Churbanov M. F., Kotereva T. V. [et al.]. Special pure germanium-rich Ga-Ge-As-Se glasses for active mid-IR fiber optics // Materials Research Bulletin. 2018. Vol. 107. P. 430–437. DOI: 10.1016/j.materresbull.2018.08.009.

28. Пат. 2573661 Российская Федерация, МПК G 01 F 23/22, G 01 F 23/292. Способ измерения уровня жидкости и устройство с нерегулярной биспирально-конической световодной структурой для его реализации (варианты) / Корнев М. С. № 2014111062; заявл. 24.03.14; опубл. 27.01.16, Бюл. № 3.

29. Моршнева С. К. Оптические свойства изогнутых волоконных световодов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Долгопрудный, 2009. 252 с.

30. Петров А. А. Лазерное формирование микролинз на базе оптических волокон: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 112 с.

31. Плеханов А. И., Шелковников В. В. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1-2. С. 240–244.

32. Фокина М. И. Формирования микрооптических поверхностей на основе фотоотверждения мономерных композиций в ближнем поле световой волны: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2012. 128 с.

33. Дервянко Д. И. Физико-химические свойства и формирование микроструктур в гибридном фотополимерном материале на основе силоксан-тиол-акрилатных олигомеров: дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск, 2017. 137 с.

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

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: [stankin1999@mail.ru](mailto:stankin1999@mail.ru)

#### Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 24.12.2018 г.

© Е. В. Леун