

Метод контроля основных параметров электроэрозионной обработки с помощью виброакустических сигналов

М. П. КОЗОЧКИН, А. Н. ПОРВАТОВ, С. Н. ГРИГОРЬЕВ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия, porvatov_artur@mail.ru

Рассмотрена возможность использования виброакустических сигналов для контроля эффективности разрядных импульсов в процессе электроэрозионной обработки. Приведены результаты исследований влияния переменных динамических характеристик заготовки и фоновых шумов процесса электроэрозионной обработки в различных частотных диапазонах на параметры виброакустических сигналов.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, разрядные импульсы, виброакустические сигналы, частотная характеристика, оптимизация режимов.

The possibility of using vibro-acoustic signals to monitor the effectiveness of discharge pulses in the electrical discharge machining process is proved to depend on the quality of measuring channel. The research results on influence of variables of the work unit dynamic characteristics and background noise, in different frequency ranges, on parameters of EDM process vibration signals are presented.

Key words: electrical discharge machining process, energy, discharge pulses, acoustic signals, frequency response optimization modes.

При электроэрозионной обработке (ЭЭО) для обеспечения заданных показателей, таких как максимальная производительность, коэффициент полезного действия, чистота поверхности и т. д., необходимо поддерживать на постоянном уровне или рационально регулировать технологические параметры, оказывающие доминирующее влияние на процесс. К важнейшим параметрам относят: размер межэлектродного промежутка (МЭП) и концентрацию продуктов эрозии в нём; температуру рабочей жидкости и скорость её прокачки; параметры разрядного тока. Зазор между электродом и обрабатываемой деталью s (зазор) в МЭП считают основной величиной, поскольку качественные параметры ЭЭО в значительной степени зависят от неё [1—3]. Именно зазор s определяет пространство, в котором происходят явления, вызывающие электрическую эрозию. Небольшое его увеличение может изменить условия пробоев рабочей среды и даже прекратить их. Обратное изменение зазора затрудняет удаление продуктов эрозии, снижает производительность процесса, приводит к «шлакованию» электродов и коротким замыканиям. Если на станке ЭЭО нет качественного автоматического регулирования зазора, процесс обработки малоэффективен [4, 5]. При регулировании зазора s необходимо ориентироваться на электрический зазор, который должен быть больше минимального s (при котором возникает короткое замыкание) и меньше максимального s (при котором пробой рабочей среды становится невозможным и возникают импульсы холостого хода). Электрический зазор может отличаться от s в два раза [1]. Для поддержания стабильного зазора s необходимо сохранять равенство между скоростями производства частиц (производительностью) M в МЭП и их эвакуации M_3 . Производительность M является функцией концентрации частиц γ и s : $M = F(s, \gamma)$. При нарушении равенства $M = M_3$ изменение концентрации $\Delta\gamma$ за время Δt можно записать как

$$\Delta\gamma = (M - M_3) \Delta t Q^{-1},$$

где Q — объём МЭП.

Для стабильного процесса ЭЭО необходимо, чтобы $\Delta\gamma = 0$, однако в силу действия целого ряда случайных факторов γ не постоянна. На основе текущей диагностической информации возникающие флуктуации необходимо оперативно ликвидировать посредством управляющих воздействий, меняющих технологические параметры.

Зависимость производительности M от зазора s при разных концентрациях γ может быть представлена в виде функции двух переменных $M = F(s, \gamma)$. Производительность непрерывно меняется при обработке даже одной детали на одном режиме из-за случайного характера изменений γ . Для конкретного значения γ зависимость $M = F(s, \gamma)$ носит экстремальный характер относительно s , но оптимальное значение зазора s_0 будет меняться с изменением γ , что определяет нестабильность самого процесса ЭЭО [2]. По мере роста γ производительность M снижается и экстремум функции $M = F(s, \gamma)$ смещается, т. е. изменяется значение оптимального зазора s_0 . Это связано с тем, что по мере внедрения электрода-инструмента (ЭИ) в материал могут ухудшаться условия отвода продуктов эрозии, M_3 уменьшается, что понижает количество рабочих импульсов (осуществляющих съём материала). Зазор s нельзя настроить заранее, он формируется в результате сочетания скоростей подачи ЭИ и съёма материала заготовки. В каждый момент времени нет достоверной информации о процессе ЭЭО в координатах функции $M = F(s, \gamma)$ и нельзя определить s_0 при существующем значении γ . В качестве индикаторов s_0 можно использовать информацию об увеличении количества импульсов короткого замыкания (при недостаточном s) или уменьшении разрядных импульсов (при излишне большом s_0). Эта информация доступна для мониторинга рабочего процесса. Импульсы короткого замыкания соответствуют максимальной силе тока при минимальном напряжении, а импульсы холостого хода характеризуются минимальной силой тока. Выделение рабочих импульсов сопряжено с применением достаточно сложной схмотехники и характеризуется инерционностью [1]. Однако объём материала, который снимают

такие импульсы, различается, поскольку часть энергии расходуется на разрушение продуктов эрозии. Увеличение площади обработки приводит к покрытию части обрабатываемой поверхности газовыми пузырями, оставшимися от предыдущих разрядов. Эти пузыри создают препятствия разрядным импульсам. Таким образом, из-за накопления газов и металлических частиц в пространстве между ЭИ и заготовкой все большее число разрядных импульсов не будет вызывать эрозии, снижая производительность. О концентрации γ можно судить по изменению сопротивления МЭП в паузах между разрядными импульсами, однако такой диагностический параметр имеет ряд недостатков. Сопротивление МЭП зависит от задаваемого технологического режима, площади и глубины обработки, режима прокачки рабочей жидкости. Этот параметр сложно регистрировать при высоких частотах разрядных импульсов, разделяемых небольшими паузами [1]. Для поддержания стабильного режима с высокой производительностью и требуемой шероховатостью обрабатываемой детали применяют различные системы регулирования технологических параметров, повышающие количество рабочих импульсов. Необходимо поддерживать количество рабочих импульсов на уровне 70...90 % общего числа разрядных импульсов, так как превышение данного уровня вызывает быстрое накопление продуктов эрозии и падение производительности. Для повышения качества регулирования процесса ЭЭО возможно применение измерительных средств, отличных от традиционно используемых. Они позволяют оценить полезную энергию, идущую на съём материала уже на ранних стадиях изменения в МЭП. При переходе от подсчёта рабочих импульсов к интегральной оценке полезной энергии, вносимой этими импульсами, можно учитывать и различия их эффективности. Это позволяет стабилизировать зазор s в окрестности s_0 при текущем значении γ . Если сравнить полезную энергию при s_0 с показателями, полученными ранее при тех же условиях, можно оценить относительную концентрацию γ . В этом случае производительность процесса ЭЭО можно записать как

$$M = \beta w P / (q \tau), \quad (1)$$

где β — полезная энергия; w — объём металла, снимаемый в единицу энергии, поступающей с рабочими импульсами; P , q , τ — энергия, скважность, длительность подаваемых импульсов.

Формулу (1) нельзя считать точной, поскольку w зависит от энергии подаваемых импульсов. Например, исследования лазерных импульсов, показали, что при уменьшении мощности лазера производительность, выражаемая в объёме расплавленного металла, получаемого за единицу времени, становится нулевой, когда мощность импульсов составляет 10 % (и менее) начального значения [6].

В [7, 8] предложено контролировать не количество рабочих импульсов (коэффициент использования импульсов), а энергию, затрачиваемую на отделение материала заготовки. В качестве контролируемых служат параметры виброакустического (ВА) сигнала (среднеквадратическое значение (СКЗ) амплитуды виброускорения в различных частотных диапазонах), измеряемые с помощью акселерометра, установленного на станке ЭЭО со стороны заготовки. Импульсы энергии разрядного тока, достигающие обрабатываемой поверхности, возбуждают в материале волновые процессы, распространяющиеся по упругой системе на значительные рас-

стояния, где и воспринимаются акселерометром. В дальнейшем можно контролировать и другие параметры — эксцесс, пик-фактор, форму дифференциального закона распределения составляющих ВА-сигнала, если эксперименты покажут их высокую эффективность [9]. Теория и практика, изучающая параметры ВА-сигналов, возникающих в механизмах при импульсном воздействии, устанавливает линейную зависимость энергий ВА-сигнала и возмущающих импульсов в пределах частотных диапазонов, определяемых формой и длительностью этих импульсов [9]. Таким образом, можно ожидать, что СКЗ амплитуды ВА-сигналов будет увеличиваться с ростом амплитуды разрядных импульсов, достигающих поверхности заготовки, по закону, близкому к линейному. Нарушать эту закономерность могут импульсы, попадающие в расплав от предыдущего разряда. В этом случае меняется форма и длительность ударного импульса, что может уменьшать энергию ВА-сигнала. Такое явление носит исключительный и негативный характер. Его необходимо минимизировать из-за влияния на шероховатость поверхности обрабатываемой детали. В общем случае негативные процессы снижают полезную энергию разрядных импульсов и энергию ВА-сигнала. Исключение составляют ВА-сигналы, возникающие в последние моменты перед отрезкой детали от заготовки, при этом начинается движение детали и разрушение перемычки, порождающие всплеск ВА-энергии [6—8].

На рис. 1 представлена параллельная запись СКЗ амплитуд ВА-сигнала в октавной полосе с центральной частотой 16 кГц и разрядного тока, регистрируемого с помощью датчика Холла.

Разрядный ток ВА-сигнал записан во время прошивки отверстия на станке ЭЭО. Прошивка продолжалась в течение 12 с (инструмент двигался дальше). В процессе ЭЭО СКЗ разрядного тока с начала процесса и до окончания было сравнительно стабильным. При этом СКЗ амплитуды ВА-сигнала (см. рис. 1, а) изменялось более сложным образом: рост сменялся падением, и разброс значений, зафиксированных в процессе прошивки, составил 100—600 мВ. После прошивки сквозного отверстия амплитуда ВА-сигнала уменьшалась до уровня помех, в то время как разрядный ток фиксировался в виде паразитных импульсов (см. рис. 1, б). Поскольку при прошивке отверстия СКЗ амплитуды тока было сравнительно постоянным, то по графику изменения амплитуды ВА-сигнала можно судить о состоянии процесса.

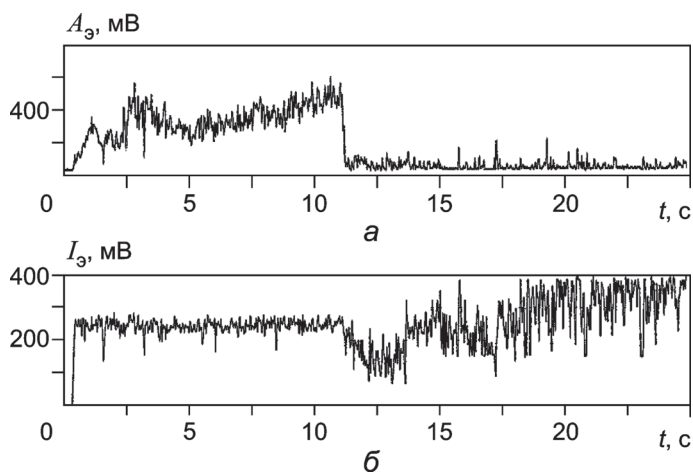


Рис. 1. Параллельная запись A_3 (а) и I_3 (б) при прошивке отверстия на станке ЭЭО «Drill 20»

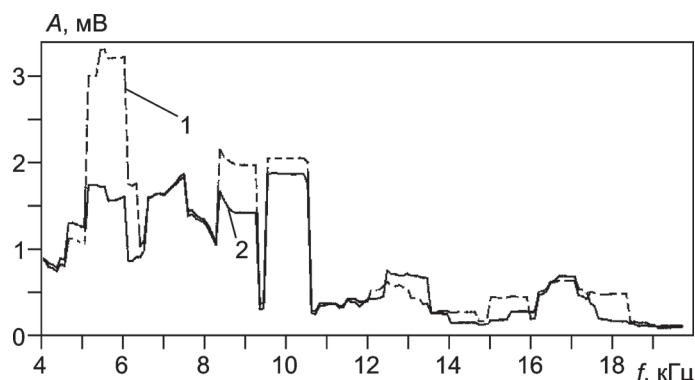


Рис. 2. Сравнение спектров ВА-сигнала при импульсном воздействии в разных точках консольной пластины:

1 — на дальнем конце пластины; 2 — в месте крепления

литуды ВА-сигнала можно судить об изменении полезной энергии, идущей на съём металла заготовки. В общем случае индикатором, отображающим эффективность затрачиваемой энергии, может служить отношение СКЗ амплитуд ВА-сигнала и разрядного тока.

В каждый момент времени у системы управления нет информации о том, как зазор s в МЭП отличается от s_0 . Увеличив зазор s посредством изменения скорости ЭИ и зафиксировав выбранный параметр ВА-сигнала, можно оценить, на какой ветви зависимости $M = F(s, \gamma)$ находится процесс ЭЭО. Если с увеличением s ВА-сигнал растёт (при постоянном значении разрядного тока), то можно заключить, что s_0 больше текущего значения зазора. Дальнейшее пошаговое регулирование зазора s и анализ изменений амплитуды ВА-сигнала позволит вывести его на оптимальное значение s_0 . Сравнив уровень ВА-сигнала при s_0 с полученными ранее в процессе выхода на экстремум значениями при минимальных значениях γ , можно оценить изменение состояния МЭП относительно γ . Это позволяет своевременно интенсифицировать прокачку рабочей жидкости или увеличить время релаксации ЭИ.

Таким образом, контроль параметров ВА-сигналов может дополнять и в некоторых вопросах даже заменять существующие методы регулирования процессов ЭЭО, поскольку они содержат прямую информацию о ходе процесса, а

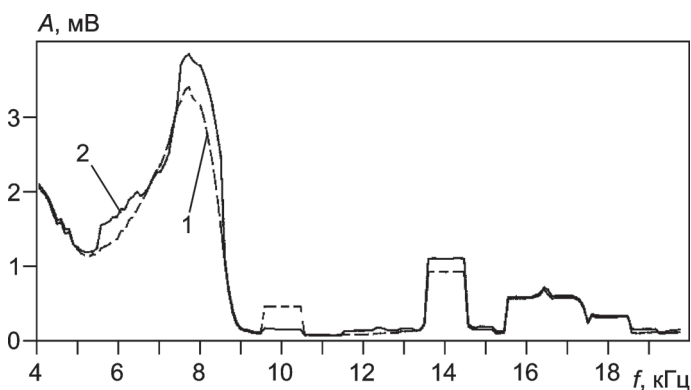


Рис. 3. Спектры ВА-сигнала при импульсном воздействии на ребро консольной пластины:

1 — для точки на расстоянии 65 мм от зажима; 2 — для точки около зажима

схема их регистрации значительно проще. Однако реализация подобных измерительно-управляющих систем возможна при условии, что есть параметры ВА-сигналов, которые монотонно меняются при изменении полезной энергии, подводимой к поверхности заготовки и помеховая составляющая которых не превышает 15 % уровня полезного сигнала.

В основе теории спектров акустических сигналов лежит известное из теории линейных динамических систем уравнение [9, 10]

$$S(f) = H(f) Q(f), \quad (2)$$

где $S(f)$ — спектр регистрируемого ВА-сигнала; $H(f)$ — частотная характеристика измерительного канала; $Q(f)$ — спектр импульсов (распределение амплитуд по частоте колебаний f), воздействующих на заготовку.

В данном случае измерительный канал представляет заготовку и приспособление, где она закреплена. Волновые процессы проходят по заготовке, передаются приспособлению, где и воспринимаются акселерометром. Таким образом, частотную характеристику $H(f)$ можно представить в виде произведения частотных характеристик заготовки и приспособления. Однако при обработке заготовки область импульсного воздействия изменяется, значит, изменяется и $H(f)$, входящая в уравнение (2), увеличивая неопределённость измерений [11—13]. Если это влияние велико, то трудно определить причину изменения спектральных составляющих ВА-сигнала: рост γ или изменение координат зоны ЭЭО на заготовке.

Каждый элемент упругой системы имеет набор собственных частот и соответствующих форм колебаний с узловыми точками, в которых данная форма теоретически неподвижна, и пучностями, в которых амплитуда колебаний данной формы наибольшая. Таким образом, при импульсном воздействии наблюдается набор пространственных стоячих волн [14—16]. При воздействии коротких импульсов на заготовку возбуждаются все формы колебаний, но их энергия зависит от координат импульсного воздействия: насколько координаты близки к пучностям или узловым точкам стоячих волн, настолько, в большей или меньшей степени, будут проявляться эти волны. Использование такого измерительного канала возможно только при условии определения частотного диапазона, в который укладывается множество собственных частот заготовки и где проявляется множество форм колебаний. Изменение координаты воздействия импульсов может ослаблять энергию одних колебаний, компенсируя это изменение приростом энергии колебаний других форм, т. е. СКЗ амплитуд ВА-сигнала в широком частотном диапазоне может оказаться не чувствительным к подобным смещениям.

Значительная доля заготовок для проволочно-вырезных станков имеет форму пластин, из которых вырезается серия одинаковых деталей. При этом меняется только координата взаимодействия с проволочным электродом. В динамических расчетах пластины моделируются как мембраны с различными краевыми условиями [17]. Экспериментальные и теоретические исследования форм колебаний различных мембран показывают, что с ростом частоты воздействия на подобные объекты плотность узловых точек и пучностей растёт. Исследования, проведённые для мембран и оболочек, показали, что с ростом частотного диапазона плотность собственных частот, т. е. их количество на единицу частотно-

го диапазона, стремится к постоянной величине [18, 19]. Однако этого условия недостаточно для включения заготовки в состав измерительного канала. Для проверки такой возможности был проведён эксперимент с консольно-закреплённой алюминиевой пластиной площадью 95×80 мм и толщиной 0,8 мм. Пластину удерживали зажимом шириной 15 мм за середину короткого края. Вдоль длинной стороны пластины от её начала до места крепления подавали серию импульсов (на равном расстоянии от краев пластины). Для подачи импульсов использовали твёрдотельный лазер с диодной накачкой серии U-15 (RMI, США) [6]. Акселерометр устанавливали на зажимном приспособлении с помощью магнита. Записанные ВА-сигналы обрабатывали посредством программы спектрального анализа (nkRecorder) [20].

На рис. 2 приведены сглаженные амплитудные спектры ВА-сигнала. Спектры 1, 2 были построены при импульсном воздействии на край и у места крепления консольной пластины, соответственно. В области частот до 11 кГц во всем частотном диапазоне преобладают амплитуды спектра 1, после — спектры различаются, наблюдается чередование преобладания амплитуд в диапазоне до 20 кГц. Период осреднения ВА-сигнала 20 мс. В амплитуде сигнала по длине пластины нет резких изменений, хотя и наблюдаются вариации.

В условиях ЭЗО, например, при проволочном ЭИ, можно отметить, что импульсное воздействие на заготовку в виде пластины осуществляется не по нормали к её поверхности, а по нормали к поверхности ребра. Жёсткость заготовки становится значительно выше. При импульсном воздействии на ребро пластины с помощью лазера разброс амплитуд колебаний в области высоких частот, вызываемый изменением координат точки воздействия, становится еще меньше по сравнению с воздействием на поверхность пластины.

На рис. 3 представлены спектры ВА-сигналов при воздействии лазерных импульсов на ребро пластины. Спектр 1 соответствует ВА-сигналу, полученному при воздействии на область, отдалённую от места зажима, а спектр 2 — наоборот, на область около зажима. При амплитуде до 11 кГц, в спектрах наблюдается различие, значительно меньшее, чем приведено на рис. 2. При амплитуде выше 11 кГц спектры почти полностью совпадают. На рис. 4 показаны доли помех в октавных полосах от внешних шумов Δ и вариации координат импульсного воздействия на плоскость пластины δ для случая импульсного воздействия на её плоскость. В октавной полосе с центральной частотой 1 кГц $\Delta = 100\%$, но в октаве 16 кГц $\Delta = 25\%$. В этой же октаве δ минимальна и составляет 14 %. С такими показателями контроль процессов ЭЗО возможен. Уменьшать погрешность можно, увеличивая жёсткость заготовки, например, воздействуя на ребро обрабатываемой пластины, как это обычно и происходит при ЭЗО. Электроэрозионной обработке подвергают труднообрабатываемые металлы и сплавы, т. е. смещение электрода происходит медленно. Такие небольшие смещения места приложения электрических разрядов изменяют частотную характеристику заготовки незначительно и не влияют на погрешность настройки s_0 с помощью параметров ВА-сигнала.

Выводы. Экспериментально доказано, что энергия ВА-сигналов, сопровождающих ЭЗО, в значительной степени определяется энергией разрядных импульсов, достигающих обрабатываемой заготовки. В перспективе это свойство параметров ВА-сигналов можно использовать для управления технологическими параметрами ЭЗО и настройки их на оп-

тимальный уровень [21—23]. Повышение качества систем управления ЭЗО на базе измерения ВА-сигналов возможно при сокращении влияния фоновых помех и вариативности динамических характеристик заготовки, т. е. при выборе высокочастотных диапазонов ВА-сигналов с полосой пропускания достаточной ширины. Уменьшению неопределённости измерений способствует повышение жёсткости заготовки и механизмов её крепления. Дальнейшей проверке подлежит предположение о том, что неопределённость оценки полезной энергии процессов ЭЗО с помощью параметров ВА-сигналов должна уменьшаться при выборе полосы пропускания в области ультразвуковых частот.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (№ 9.1188.2014/К).

Математическое обеспечение для обработки ВА-сигналов было разработано в рамках выполнения гос. задания в сфере научной деятельности № 9.1557.2014/К от 11.07.2014 г.

Литература

1. Коренблюм М. В., Левит М. Л., Лившиц А. Л. Адаптивное управление электроэрозионными станками. М.: НИИНМаш. 1977.
2. Гуткин Б. Г. Автоматизация электроэрозионных станков. Л.: Машиностроение, 1971.
3. Серебrenицкий П. П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование. СПб.: Лань, 2013.
4. Немиллов Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. Л.: Машиностроение, 1989.
5. Артамонов Б. А., Волков Ю. С. Анализ моделей электрохимической и электроэрозионной обработки. Часть II. Модели процессов электроэрозионной обработки. Проволочная вырезка. М.: ВНИИПИ, 1991.
6. Григорьев С. Н., Козочкин М. П. Виброакустическое диагностирование электрофизических процессов как метод повышения качества обработки // Вестник машиностроения. 2015. № 8. С. 3—7.
7. Козочкин М. П., Григорьев С. Н., Окунькова А. А., Порватов А. Н. Контроль процессов электроэрозионной обработки по параметрам акустической эмиссии // СТИН. 2015. № 8. С. 28—33.
8. Григорьев С. Н., Козочкин М. П., Федоров С. В., Порватов А. Н., Окунькова А. А. Исследование процесса электроэрозионной обработки средствами виброакустической диагностики // Измерительная техника. 2015. № 8. С. 33—37.
9. Балицкий Ф. Я., Иванова М. А., Соколова А. Г., Хомяков Е. И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. М.: Наука, 1984.
10. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение. 1987.

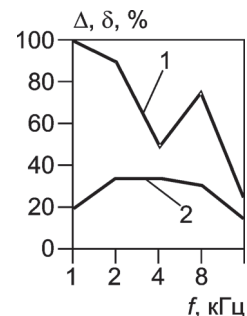


Рис. 4. Помехи в октавных полосах от внешних шумов и вариации координат импульсного воздействия на плоскость пластины для случая импульсного воздействия на её плоскость:

1 — зависимость шумовой составляющей ВА-сигнала от частоты октавных полос Δ ; 2 — отклонение по октавам СКЗ амплитуды ВА-сигнала от среднего значения δ

11. Козочкин М. П., Порватов А. Н. Оценка неопределённости при решении задач многопараметрической диагностики // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 41—45.

12. Анищенко В. С. Знакомство с нелинейной динамикой. М.: ЛКИ, 2008.

13. Altpeter F., Cors J., Kocher M., Longchamp R. EDM modeling for control // 12th International Symposium For Electromachining, 1998. — P. 149—155.

14. Козочкин М. П. Влияние нормальных мод колебаний технологической системы на качество обработки резанием // Вестник машиностроения. 2015. № 3. С. 59—65.

15. Завгородний В. И., Козочкин М. П., Маслов А. Р., Сабиров Ф. С. Влияние динамических характеристик инструмента и заготовки на результаты виброакустического контроля процесса резания // СТИН. 2010. № 6. С. 13—17.

16. Козочкин М. П. Влияние динамических характеристик станочных узлов на вибрации при резании // СТИН. 2014. № 2. С. 4—8.

17. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука. 2004.

18. Koresheva N. S., Khromatov V. E. On the influence of a transverse magnetic field on the vibration spectra of shallow shells // Mechanics of Solids. 2009. T. 44. N. 4. P. 632—638.

19. Вибрации в технике. Том 6. Колебания линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978.

20. Св-во гос. рег. прог. для ЭВМ 2009613214 РФ. Программный комплекс сбора, обработки и анализа вибрационных сигналов pkRecorder / Н. А. Кочинев, Ф. С. Сабиров // ОБПБТ. 2009. № 4(69).

21. Grigoriev S. N., Kozochkin M. P., Sabirov F. S., Kutin A. A. Diagnostic systems as basis for technological improvement // Proc. CIRP. 2012. T. 1. C. 599—604.

22. Козочкин М. П., Порватов А. Н., Сабиров Ф. С. Оснащение технологического оборудования информационно-измерительными системами // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 29—32.

Дата принятия: 20.10.2015.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

543.427.34:536.2

Изменение химического состава анализируемого объекта при низковольтном электронно-зондовом рентгеноспектральном микроанализе

А. Ю. КУЗИН¹, В. Б. МИТЮХЛЯЕВ², П. А. ТОДУА², М. Н. ФИЛИППОВ^{2, 3}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, e-mail: kuzin@vniims.ru

² Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Москва, Россия, e-mail: fgupnicpv@mail.ru

³ Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Россия, e-mail: fil@igic.ras.ru

Предложена феноменологическая модель оценки изменений состава анализируемого микрообъёма при низковольтном электронно-зондовом рентгеноспектральном микроанализе. Изменения обусловлены термическим воздействием электронного зонда. Выведены соотношения, связывающие метрологические характеристики низковольтного электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа с термодинамическими характеристиками образца и условиями эксперимента. Полученные результаты позволяют априорно выбирать режим проведения анализа, обеспечивающий устранение погрешностей, которые обусловлены термической неустойчивостью объекта исследований.

Ключевые слова: низковольтный электронно-зондовый рентгеноспектральный микроанализ, тепловое воздействие, электронный зонд.

A phenomenological model is proposed of estimating the composition changes of an analyzed microvolume at low-voltage electron probe X-ray microanalysis. The changes are caused by thermal effect of an electron probe. The relations are derived, connecting metrological characteristics of low-voltage electron probe X-ray microanalysis with thermodynamic characteristics of a specimen and the experiment conditions. The obtained results allow a priori to choose such mode of analysis, which can ensure elimination of errors induced by thermal instability of the object under investigation.

Key words: low-voltage electron probe X-ray microanalysis, thermal effect, electron probe.

Переход к низким энергиям электронного зонда (3—5 кэВ) представляет существенный интерес для локального химического анализа и диагностики нанообъектов [1]. Основным преимуществом низковольтного электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа (ЭЗРСМА) является дос-

тижение нанометровой локальности определения химического состава.

Нагрев анализируемого микрообъёма увеличивается по мере уменьшения энергии электронов [2]. Для объектов с низкой теплопроводностью это может привести к их полно-