



Ключевые слова:
электроэрозионный
копировально-про-
шивочный станок,
точность станка,
погрешность пере-
мещений, жест-
кость, погрешность
позиционирова-
ния, температурная
погрешность

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОГО РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО КОПИРОВАЛЬНО- ПРОШИВОЧНОГО СТАНКА С ЧПУ

Михаил ТУРКИН

Рассмотрены основные факторы, влияющие на точность электроэрозионного копировально-прошивочного станка с ЧПУ. Предложена методика комплексного расчета точности станка, основанная на последовательном выявлении факторов, влияющих на работу станка, а также анализе качественных и количественных параметров всех составляющих погрешности. Приведены результаты практического применения предлагаемой методики при оптимизации конструкции базовых элементов станка.

Создание современного высокотехнологичного металлообрабатывающего оборудования связано с непрерывным повышением требований к точности станков [1–5]. Одним из видов прецизионного оборудования являются электроэрозионные копировально-прошивочные станки, предназначенные для обработки точных деталей сложной конфигурации из токопроводящих заготовок, в том числе при обработке деталей из твердых сплавов и термоупрочненных сталей.

На точность и качество изготовления деталей методом электроэрозионной обработки влияет множество различных факторов, в том числе свойства материала заготовки, свойства электрод-инструмента, характеристика импульсов, количество проходов, колебания температуры окружающей среды, точность позиционирования и непрямолинейность перемещения исполнительных органов станка, жесткость станка и т.д. Эти же факторы учитываются и при разработке конструкций электроэрозионных копировально-прошивочных станков.

Прежде чем приступить к анализу факторов, влияющих на точность электроэрозионного копи-

ровально-прошивочного станка, и описанию методики комплексного расчета точности, необходимо проанализировать конструктивные особенности станка и схему расположения его осей.

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СТАНКА

На рис. 1 приведен общий вид исполнительной системы отечественного электроэрозионного копировально-прошивочного станка, разработанного Государственным инженеринговым центром МГТУ «СТАНКИН» в рамках НИОКР «Прошивка», выполняемой по госконтракту по заказу Минпромторга России.

На станине, представляющей собой литую деталь сложной формы, располагается неподвижная рабочая ванна. В ней расположен рабочий стол, на который устанавливается заготовка при необходимости 3-координатной обработки. Для 5-координатной обработки на рабочий стол устанавливается 2-координатный глобусный стол. Ванна оснащена двумя дверца-

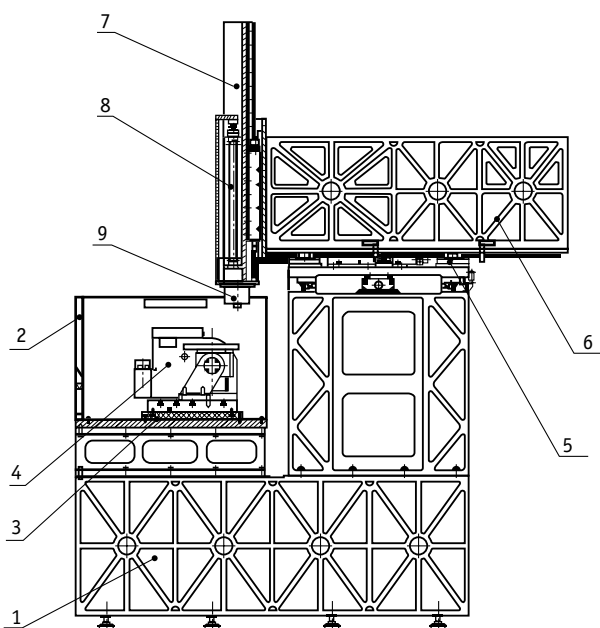


Рис. 1. Общий вид исполнительной системы электроэрозионного копировально-прошивного станка: 1 – станина, 2 – неподвижная рабочая ванна, 3 – рабочий стол, 4 – глобусный стол, 5 – двухкоординатный узел, 6 – консоль оси Y , 7 – пиноль оси Z , 8 – пневмоцилиндр, 9 – электрод-инструмент

ми, открывающимися наружу, для облегчения установки заготовки на рабочий или глобусный стол.

Перемещение рабочего органа по двум взаимно перпендикулярным осям X и Y осуществляется при помощи 2-координатного узла, который оснащен профильными линейными направляющими (ПЛН) и двумя прецизионными линейными электроприводами (ПЛЭ). При помощи ПЛЭ по ПЛН перемещается консоль оси Y .

На консоли оси Y закреплена пиноль оси Z . Ось Z направлена вертикально и перпендикулярно осям X и Y . Перемещение по оси Z также осуществляется при помощи ПЛЭ. Для удержания пиноли на месте в случае аварийного отключения электропитания в ее конструкцию включен пневмоцилиндр. На пиноли оси Z закреплён узел фиксации электрода-инструмента.

На рис. 2 приведена схема расположения осей отечественного электроэрозионного копировально-прошивного станка.

Процесс формообразования детали происходит за счет перемещений по осям главного движения X , Y и Z . Перемещение электрода-инструмента вдоль осей X , Y и Z позволяет получить необходимый профиль детали. При необходимости 5-координатной обработки, заготовка устанавливается на поворотный

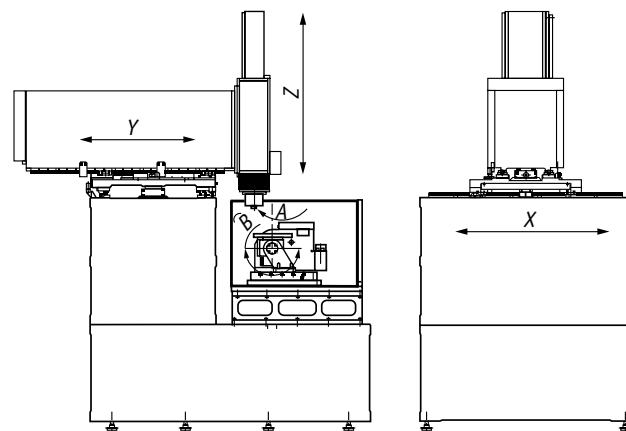


Рис. 2. Схема расположения координатных осей копировально-прошивного станка

глобусный стол, при помощи которого осуществляется поворот заготовки вокруг осей A и B .

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ СТАНКА

Сущность методики комплексного расчета точности станка заключается в последовательном выявлении совокупности факторов, влияющих на работу станка, анализе и формализации качественных и количественных параметров всех составляющих погрешности.

Точность обработки деталей на электроэрозионных станках напрямую зависит от таких факторов, как:

- базирование заготовки на рабочем столе станка;
- отклонения при позиционировании исполнительных органов станка;
- непрямолинейность перемещения исполнительных органов станка;
- погрешности при изготовлении базовых деталей станка;
- величины упругих деформаций (жесткость) системы;
- колебания температуры окружающей среды в процессе обработки;
- износ электрода-инструмента.

Суперпозиция вышеперечисленных факторов приводит к погрешности геометрической формы профиля обрабатываемой детали.

Погрешность базирования заготовки на рабочем столе является существенным фактором, влияющим на точность, однако, поскольку перед процессом обработки производится обязательная калибровка положения заготовки, отклонения формы и размеров готовой детали, вызываемые погрешностью базирования на рабочем столе, могут быть сведены к минимуму [6].

Высокая точность обработки достигается за счет точности осевых перемещений, точности формы и расположения базовых поверхностей исполнительного органа и жесткости конструкции. Точность осевых перемещений наиболее рационально достигается за счет использования ПЛЭ и ПЛН со сниженным коэффициентом трения. ПЛЭ имеют достаточное тяговое усилие при больших ускорениях, малое энергопотребление и стабильно работают в течение всего срока службы электроэрозионного станка [7]. ПЛН ультрапрецизионного класса обладают высокой жесткостью и точностью геометрической формы.

Кроме того, точность перемещений во многом зависит от датчиков положения. В качестве датчиков обратной связи по положению используются фотоэлектрические преобразователи измерительных линейных перемещений (ПИЛП), следовательно, точность позиционирования исполнительных органов станка будет зависеть от точности датчиков положения. В конструкции глобусного стола в качестве датчиков обратной связи по положению используются преобразователи измерительных круговых перемещений (ПИКП), следовательно, точность позиционирования по осям *A* и *B* будет зависеть от точности ПИКП.

Прямолинейность перемещения исполнительных органов является следствием погрешности изготовления и монтажа ПЛН.

Наличие неизбежных при работе станка выделений тепла, а также внешние температурные воздействия вызывают погрешность, обусловленную температурным расширением конструкционных материалов.

В дополнение к вышеперечисленным, важным фактором, влияющим на точность обработки, является деформация консоли оси *Y*, вызываемая собственным весом конструктивных элементов станка, перемещающихся в процессе обработки. Причем деформация станины является единственным фактором, влияющим на точность, который не поддается корректировке в процессе эксплуатации и зависит от конструкции, материала и качества изготовления консоли.

Таким образом, точность станка определяется погрешностью перемещений исполнительных органов и жесткостью конструкции. Суммарная погрешность вычисляется по формуле:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}, \quad (1)$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta a, \Delta b$ – погрешности по каждой из осей станка.

В рассматриваемом случае погрешность по любой из осей определяется суперпозицией

влияющих факторов, заданных системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \Delta x_n + \Delta x_t + \Delta x_{напр.} \\ \Delta y &= \Delta y_n + \Delta y_t + \Delta y_{напр.} \\ \Delta z &= \Delta z_n + \Delta z_t + \Delta z_{напр.} \\ \Delta a &= \Delta a_n + \Delta a_{напр.} \\ \Delta b &= \Delta b_n + \Delta b_{напр.} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n$ – погрешности позиционирования преобразователей измерительных линейных перемещений ПИЛП по каждой из осей, мкм; $\Delta x_t, \Delta y_t, \Delta z_t$ – погрешности по каждой из осей, вызванные температурным расширением стали, мкм; $\Delta x_{напр.}, \Delta y_{напр.}, \Delta z_{напр.}$ – погрешности обусловленные непрямолинейностью перемещения направляющих по каждой из осей, мкм; $\Delta a_{напр.}, \Delta b_{напр.}$ – погрешности направляющих глобусного стола, определяемые производителем, мкм; $\Delta a_n, \Delta b_n$ – погрешности позиционирования ПИКП по каждой из осей глобусного стола.

Погрешности позиционирования ПИЛП и ПИКП напрямую зависят от класса точности преобразователя. Погрешность позиционирования ПИЛП также зависит от длины измерения и вычисляется по формуле:

$$\Delta_{\Pi} = A + B \cdot L_{изм.}, \quad (3)$$

где *A* и *B* – расчетные коэффициенты, зависящие от класса точности ПИЛП [8]; $L_{изм.}$ – максимальная длина измерения по каждой из осей, м.

В свою очередь, общая погрешность ПИКП определяется изготовителем [8].

Погрешность, обусловленная температурным расширением конструкционных материалов, определяется по формуле:

$$\Delta_T = \alpha \cdot L_{изм.} \cdot \Delta T, \quad (4)$$

где α – коэффициент температурного расширения; ΔT – диапазон изменения температуры, °С.

Погрешность перемещения определяется, во-первых, неточностью изготовления и монтажа ПЛН, а во-вторых, собственно деформацией консоли оси *Z*. Таким образом, погрешность перемещения задается системой зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{напр.} &= \Delta x_{уст.} + \Delta x_{напр.} + \Delta \kappa. \\ \Delta y_{напр.} &= \Delta y_{уст.} + \Delta y_{напр.} + \Delta \kappa. \\ \Delta z_{напр.} &= \Delta z_{уст.} + \Delta z_{напр.} + \Delta \kappa. \\ \Delta a_{напр.} &= \Delta a_{уст.} + \Delta a_{напр.} \\ \Delta b_{напр.} &= \Delta b_{уст.} + \Delta b_{напр.} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\Delta x_{уст.}$, $\Delta y_{уст.}$, $\Delta z_{уст.}$ – погрешность установки направляющих по каждой из осей, мкм; $\Delta a_{уст.}$, $\Delta b_{уст.}$ – погрешность установки глобусного стола по каждой из осей, мкм; $\Delta x_{напр.}$, $\Delta y_{напр.}$, $\Delta z_{напр.}$ – погрешность направляющих, определяемая производителем, мкм. $\Delta a_{напр.}$, $\Delta b_{напр.}$ – погрешность направляющих глобусного стола, определяемая производителем, мкм; Δ_{κ} – деформация консоли станка, мкм.

Подставив (3), (4) и (5) в (2) получаем систему зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= A + B \cdot L_{изм.} + \alpha \cdot L_{изм.} + \Delta x_{уст.} + \Delta x_{напр.} + \Delta_{\kappa} \\ \Delta y &= A + B \cdot L_{изм.} + \alpha \cdot L_{изм.} + \Delta y_{уст.} + \Delta y_{напр.} + \Delta_{\kappa} \\ \Delta z &= A + B \cdot L_{изм.} + \alpha \cdot L_{изм.} + \Delta z_{уст.} + \Delta z_{напр.} + \Delta_{\kappa} \\ \Delta a_{напр.} &= \Delta a_{уст.} + \Delta a_{напр.} \\ \Delta b_{напр.} &= \Delta b_{уст.} + \Delta b_{напр.} \end{aligned} \right\} (6)$$

Полученная система зависимостей позволяет рассчитать проектируемую точность станка. Использование системы зависимостей также позволяет провести количественный анализ факторов, влияющих на точность станка, и оптимизировать его конструкцию в части, касающейся точности используемых ПИЛП, применяемых материалов и температурных условий эксплуатации.

АЛГОРИТМ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ СТАНКА

Алгоритм комплексного расчета точности станка можно представить в приведенном ниже виде.

1. Определить факторы, влияющие на работу станка.
2. Классифицировать факторы.
3. Проанализировать влияние факторов.
4. Определить суперпозиции влияющих факторов по каждой из осей и составить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \sum_{i=1}^k \Delta x_i \\ \Delta y &= \sum_{i=1}^k \Delta y_i \\ &\dots \\ \Delta n &= \sum_{i=1}^k \Delta n_i \end{aligned} \right\} (7)$$

5. Вывести зависимость для всех i -ых элементов системы уравнений (7) с учетом особенностей обработки, паспортных особенностей оборудования и т.д.
6. Подставить зависимости в систему (7) и получить итоговую систему уравнений для вычисления комплексной точности станка.
7. Получить итоговую систему уравнений для вычисления точности станка.

8. Вычислить значение комплексной точности, воспользовавшись полученной системой уравнений.
9. Проанализировать полученные результаты.
10. С учетом результатов анализа провести корректировку и оптимизацию конструкции станка.
11. Рассчитать допуски.

Возможность проведения количественного анализа факторов, влияющих на точность станка, позволяет поэтапно оптимизировать конструкцию станка. В качестве примера рассмотрим выбор оптимальной конструкции консоли разработанного станка.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КОНСОЛИ ОСИ Y

Жесткость консоли оси Y является одним из основных факторов, влияющих на точность станка, так как от нее напрямую зависит геометрическая точность перемещения по каждой из осей. Анализ влияния других факторов показывает наличие возможностей минимизации этого влияния разными способами. Так, влияние колебаний температуры минимизируется за счет эксплуатации оборудования в термостатном помещении и применения системы термостабилизации рабочей зоны станка, погрешности позиционирования исполнительных органов станка можно скорректировать за счет управления приводами с обратной связью. Жесткость станины зависит только от конструкции, материала, качества изготовления и корректировке не поддается.

Расчеты на жесткость проводились с использованием метода моделирования различных вариантов станины при помощи САПР SolidWorks.

При расчете на жесткость было рассмотрено несколько вариантов конструкции консоли оси Y с одинаковыми габаритными размерами. Расчет проводился для случая нагружения, когда консоль оси Y расположена в крайнем положении по оси Y. В этом случае консоль будет подвергаться наибольшему изгибу. Все варианты конструкции консоли нагружались весом равным 2500 Н. Направление нагрузки совпадало с направлением вектора силы тяжести. Вес был приложен к концу консоли оси Y, на котором закрепляется пиноль оси Z.

В первом варианте конструкции консоль оси Y представляет собой литую прямоугольную деталь, разделенную на три секции двумя поперечными ребрами. Консоль имеет ребра жесткости, направленные наружу относительно вертикальных опорных стенок. Для облегчения конструкции в вертикальных опорных стенках консоли сделано шесть круглых отверстий. Результаты деформации приведены на рис. 3. Оттенки различных зон деформации соответствуют значениям на шкале деформации, приведенной в правой части рисунка. Для данного варианта конструкции максимальная расчетная деформация равна 12 мкм.

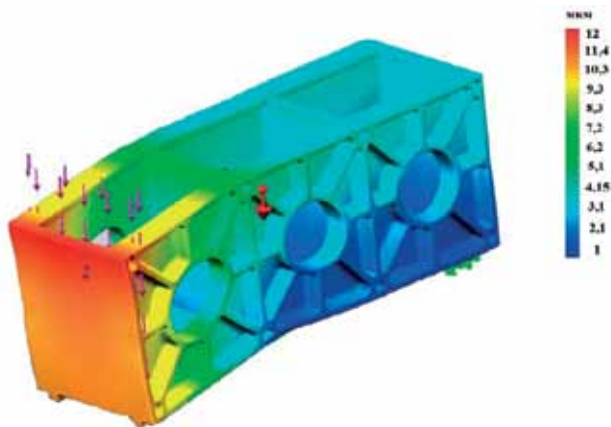


Рис. 3. Диаграмма деформации первого варианта конструкции консоли оси Y

Во втором варианте из конструкции консоли оси Y были исключены круглые отверстия, добавлены два поперечных и одно продольное ребро жесткости. Результаты моделирования показывают, что максимальная расчетная деформация консоли оси Y равна 4 мкм (рис. 4).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что второй вариант конструкции консоли оси Y является оптимальным, поскольку обладает максимальной высокой жесткостью при сопоставимых массогабаритных характеристиках [9].

ВЫВОДЫ

Проанализированы факторы, влияющие на точность спроектированного отечественного электроэрозионного копировально-прошивочного станка с ЧПУ. Основными факторами, определяющими точность станка, являются отклонения при позиционировании исполнительных органов станка; непрямолинейность перемещения исполнительных органов станка; погрешности при изготовлении базовых деталей станка; величины упругих деформаций (жесткость) системы.

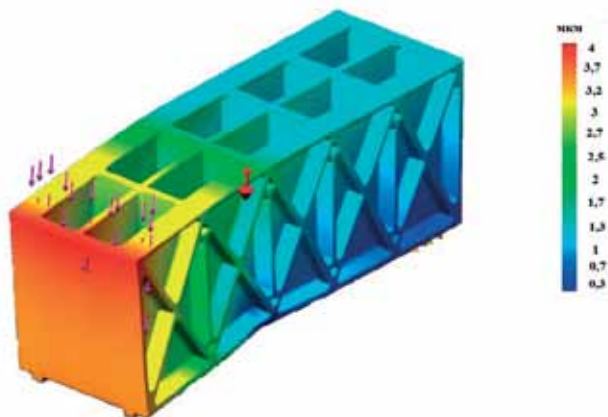


Рис. 4. Диаграмма деформации второго варианта конструкции станины

Предложена методика и алгоритм комплексного расчета точности станка, использованные при проектировании отечественного электроэрозионного копировально-прошивочного станка с ЧПУ.

Предложенная методика получила практическое подтверждение при проведении оптимизации базового элемента конструкции станка в ходе реализации НИОКР «Прошивка» по созданию отечественного электроэрозионного копировально-прошивочного станка с ЧПУ.

Предложенная методика получила практическое подтверждение при проведении оптимизации базового элемента конструкции станка в ходе реализации НИОКР «Прошивка» по созданию отечественного электроэрозионного копировально-прошивочного станка с ЧПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С.Н. Решение задач технологического перевооружения машиностроения // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 4. С. 5–9.
2. Григорьев С.Н., Власов В.И. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. – М.: ИТО, 2010. 108 с., ил.
3. Черпаков Б.И., Григорьев С.Н. Тенденции развития технологического оборудования в начале XXI века // Ремонт, восстановление, модернизация. 2003. № 10. С. 2–7.
4. Грибков А.А., Григорьев С.Н., Захарченко Д.В. Развитие зарубежного и российского станкостроения // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 1. С. 8–11.
5. Григорьев С.Н. Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2010. № 3. С. 7–13.
6. Окунькова А.А. Особенности программирования электроэрозионного проволочного оборудования с ЧПУ // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2010. № 2. С. 3–10.
7. Чекалова Е.А. Технологические процессы электрофизических и электрохимических методов обработки: Учебн. пособие. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2007. 204 с.
8. Электроэрозионные станки с ЧПУ [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Компания «Содик», 2012. Режим доступа: <http://www.sodick.ru/>, свободный.
9. Инкрементные фотоэлектрические преобразователи перемещений [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Открытое акционерное общество «СК БИС», 2012. Режим доступа: <http://www.skbis.ru>, свободный.
10. Материал научно-технического отчета III этапа НИОКР «Создание электроэрозионного копировально-прошивочного станка с числовым программным управлением с 2 горизонтальными осями вращения с точностью обработки до ± 5 мкм».

ТУРКИН Михаил Владимирович –

кандидат технических наук, начальник отдела развития производственных технологий ПАО «ОАК»