

DOI: 10.34031/article_5ca1f634ef76c8.31770383

¹Поляков А.Н., ¹Гончаров А.Н., ^{1,*}Парфёнов И.В.¹Оренбургский государственный университет
Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

*E-mail: ivparfenov@mail.ru

МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ СТАНКА С ЧПУ

Аннотация. Работа посвящена вопросу обеспечения точности обработки на станках с числовым программным управлением за счет коррекции возникающей в них температурной погрешности. Рассмотрено построение системы коррекции температурной погрешности станка, основанной на применении устройства автоматического измерения детали, установленного на нем. Анализа различных источников показал, что методика коррекции погрешностей обработки, вызванных статическими и динамическими факторами, построенная на технологии автоматического измерения детали на станке, в литературе в определенной степени рассмотрена. Однако вопросы коррекции температурной погрешности станка с использованием технологии автоматического измерения детали на станке в открытой печати представлены в объеме, недостаточном для ее практической реализации. Поэтому в данной работе приведена разработанная методика практической реализации алгоритмов управления рабочими органами станка, компенсирующими его температурную погрешность с использованием технологии автоматического измерения детали на станке. Методика содержит семь основных этапов, охватывающих четыре области работ: экспериментальную; программно-математическую; измерительную и подготовку управляющих программ для станков с числовым программным управлением. Доказано, что представленная методика позволяет разработать для любого станка индивидуальную автоматизированную систему коррекции возникающей температурной погрешности. Показано, что важнейшими направлениями повышения эффективности такой системы являются обеспечение полноты экспериментальной базы и точность настройки алгоритмов коррекции температурной погрешности станка.

Ключевые слова: методика, температурная погрешность станка, тепловые характеристики, измерительный щуп, ОММ-технологии, управляющая программа.

Введение. Одним из важнейших фактором обеспечения точности станков с числовым программным управлением (ЧПУ), работающих при максимальных значениях коэффициента загрузки оборудования, являются температурные деформации элементов несущей системы [1–4]. Несмотря на то, что в последние три десятилетия изготовителями станков уделяется очень большое внимание влиянию тепловых процессов на точность обработки, по-прежнему температурная погрешность станков остается важнейшей составляющей в общей погрешности обработки. Например, последние исследования тепловых деформаций профилировального станка для зубчатых колес показали их существенное влияние на точность образования профиля колес по осям X и Y [5]. При относительно небольших избыточных температурах, менее 12 °С, максимальные температурные перемещения шпинделя по оси Y составили около 42 мкм. Опрос 55 производителей станочного оборудования восьми стран мира, включая Японию, Германию и Китай, а также 20 потребителей станков из Германии позволил сделать следующий вывод: несмотря на накопленный опыт промышленности в отношении теплового поведения станков, результаты решения проблемы минимизации температурной погрешности станков не в полной мере

отвечают требованиям производства [6]. При этом в опросе принимали участие малые, средние, крупные и очень крупные предприятия. Их опыт показал, что тепловая погрешность в станках существенно превышает геометрическую, статическую и динамическую погрешность. Даже в условиях современного высокотехнологичного производства тепловые погрешности обработки являются определяющими почти для 50 % бракованных изделий. Было установлено, что в равной степени на температурную погрешность влияет: производственный процесс, внутренние источники тепла и окружающая среда. Также было установлено, что, несмотря на то, что применение систем термостабилизации станков противоречит вопросам энергоэффективности, предпочтением потребителей является термостабильность – почти 75 % всех компаний отдадут приоритет термостабильности процесса обработки и минимизации температурной погрешности.

Современные станки с ЧПУ оснащаются различными измерительными системами, которые могут использоваться для повышения точности обработки [7, 8]. Наиболее распространенной системой, устанавливаемой на станках с ЧПУ, является система измерения детали [9–13]. Интел-

лектуальное использование таких систем в технологическом процессе изготовления каждой детали позволяет существенно поднять точность обработки на станке с ЧПУ без дооснащения станка дополнительными системами коррекции погрешностей, что позволяет существенно снизить себестоимость выпускаемой продукции. Так в работе [14] рассмотрен ультрапрецизионный шлифовальный станок с точностью позиционирования равной 100 нм (0,1 мкм). Использование системы измерения детали на станке позволило выполнить трехкратную коррекцию профилирования асферической обрабатываемой поверхности. Это привело к сокращению погрешности обработки профиля от 1867 нм до 177 нм. В работе [15] представлена методика обеспечения точности контурного фрезерования тонкостенных деталей на примере лопаток турбин на 5-ти осевом станке вертикальной компоновки с двухосевым столом VMC-C30. Результаты натуральных экспериментов с использованием системы измерений обрабатываемой детали на станке показали возможность снижения погрешности обработки на 70 %.

В общем случае, под интеллектуальным использованием систем коррекции погрешностей станка можно понимать реализацию специальных алгоритмов управления точностью обработки на станках с ЧПУ путем внесения изменений в код управляющих программ, использующих данные системы измерения геометрических параметров обрабатываемой детали, установленной на станке. Обзор проводимых в механообработке исследований показал, что методика коррекции погрешностей обработки, вызванных динамическими и статическими факторами, построенная на ОММ-технологии (ОММ – On Machine Measurement) [7–15], находит отражение в литературе. Вопросы коррекции температурной

погрешности станка с использованием ОММ-технологии мало представлены в открытой печати. Поэтому данная работа актуальна и посвящена разработке методики реализации алгоритмов управления рабочими органами станка, компенсирующими его температурную погрешность с использованием ОММ-технологии.

Описание методики. *Условия реализации методики.* Для реализации ОММ-технологии в алгоритмах управления рабочими органами станка, направленными на коррекцию его температурной погрешности, станок должен быть оснащён измерительным щупом. Если измерительный щуп не предусмотрен комплектацией станка, то для подавляющего большинства станков с ЧПУ это является доступным опциональным дооснащением. Необходимым условием реализации этого дооснащения является наличие незадействованной управляемой координаты системы ЧПУ. После установки щупа необходимо осуществить его калибровку. Методика включает семь этапов.

Содержание основных этапов методики.

Первый этап – формирование исходных данных в виде совокупности экспериментальных тепловых характеристик. На этом этапе проводится анализ технологического процесса изготовления детали и формируется базовая циклограмма работы оборудования.

На втором этапе осуществляется построение прогнозируемых температурных смещений рабочих органов станка, работающего по циклограмме, позволяющих определить корректирующие управляющие воздействия на рабочие органы станка.

Теоретические корректирующие воздействия задаются в виде аппроксимирующих функций [16]

$$\hat{\delta}_n(t_j) = \sum_{k=1,5,\dots,4m-3} x_{k,n} (1 - e^{-(t_j - x_{k+3})/x_{k+1,n}}) + \sum_{k=1,5,\dots,4m-3} x_{k+2,n} e^{-(t_j - x_{k+3})/x_{k+1,n}}, \quad (1)$$

где $x_{k,n}$, $x_{k+1,n}$, $x_{k+2,n}$, $x_{k+3,n}$ – модальные параметры тепловых процессов в станке; k – индексация модальных параметров; m – число температурных мод; t_j – фиксированный момент времени, в который проводились измерения; $\hat{\delta}_n(t_j)$ – значение температурного перемещения по n -ой координате, принимающей значения в соответствии с осями $n \rightarrow X, Y, Z$ в j -й момент времени.

Числовые значения модальных параметров, получаются с применением автоматизированной системы расчета корректирующих воздействий (АСРКВ). АСРКВ реализована в системе MATLAB.

Рассчитанные значения перемещений (1) определяют необходимость внесения изменений в циклограмму работу станка для выполнения текущих измерений измерительным щупом и выполнения последующих корректирующих воздействий. Как правило, это приводит к увеличению числа технологических переходов и изменению длительности каждого технологического перехода.

Третий этап – адаптация управляющих программ (УП) для станка с ЧПУ к введению коррекции температурной погрешности. Адаптация УП заключается в изменении кода программы за счет включения двух блоков: блока текущей координатной коррекции по соответствующей оси и

блока учета промежуточного измерения базовой плоскости системы координат детали (workpiece coordinat system WCS). Внесение изменений в код управляющих программ для станка с ЧПУ, в нашем случае, осуществлялся вручную, несмотря на то, что управляющая программа может быть написана с использованием САМ-системы.

Четвертый этап – первое измерение базовой поверхности в ходе обработки заготовки, положение которой по соответствующей оси принимается в качестве «нуля». Относительно этого уровня будут осуществляться все последующие измерения, расчет и выполнение корректирующих смещений рабочих органов станка. На основании результатов этого измерения будет уточнено предварительно заданное положение базовой поверхности, так как положение этой поверхности может изменяться дополнительно при изменении температуры окружающей среды в помещении с установленным станком.

При осуществлении измерений измерительным щупом в качестве результирующего значения по соответствующей оси в систему ЧПУ передается относительное положение наконечника измерительного щупа – относительно некоторого нулевого уровня, используемого при измерении. Если в качестве нулевого уровня принят ноль станка, то в этом случае возвращаемым значением при измерении является относительное положение измеряемой поверхности.

Пятый этап – эксплуатационный или этап отработки УП. При проведении резания строгое соблюдение (rigid adherence) температурного режима – температуры окружающей среды, является условием обеспечения точности обработки. При отработке управляющей программы обработки детали, с внесенными в её код корректирующими воздействиями, в помещении с установленным станком должен быть реализован температурный режим, при котором формировались исходные данные для определения корректирующих воздействий.

Шестой этап – контрольная операция, выполняемая на стационарной координатно-измерительной машине, в ходе которой формируется вектор измеренных размеров P и осуществляется сравнение с заданным вектором размеров деталей T . При превышении возможной погрешности обработки, установленной чертежом детали, выполняется переход к следующему блоку решения R . В этом блоке оценивается возможность продолжения изготовления детали или принимается решение о завершении её обработки из-за непоправимых погрешностей.

Седьмой этап – модификация УП.

Результаты. Натурные испытания осуществлялись на станке 400V (ООО «НПО Станкостроение», г. Стерлитамак, Россия). Измерительная система, установленная на станке, построена на основе измерительного щупа TC50 фирмы Blum Novotest (Германия). Традиционно, тепловые характеристики станка в виде зависимости «температурные перемещения – время» $\delta(t)$ строятся по результатам текущих измерений фланца шпиндельной головки по соответствующему координатному направлению X , Y или Z . Однако в современном высокотехнологичном производстве тепловые характеристики $\delta(t)$ строятся по данным измерений непосредственно на станке с использованием измерительного щупа.

Так как результатом применения методики коррекции температурной погрешности станка является коррекция перемещений подвижных исполнительных рабочих органов конкретного станка, то результатами реализации первого этапа методики являются результаты натурных испытаний этого станка. Однако так как существуют, по крайней мере, две методики проведения натурных испытаний (с использованием измерительного щупа и без него), то в данной работе дополнительно был выполнен сравнительный эксперимент. Для оценки идентичности двух реализуемых подходов для формирования исходных данных была проведена серия экспериментов для различных частот вращения шпинделя. Согласно общей концепции методики экспериментальные значения перемещений должны фиксироваться для всего диапазона частот вращения шпинделя с шагом 1000 об/мин. Значения перемещений для промежуточных значений частот вращения должны находиться из аппроксимации текущих дискретных значений. В данном исследовании эксперименты проводились для пяти частот вращения шпинделя: 1000, 2000, 3000, 4000 и 5000 об/мин. Сначала строились тепловые характеристики по значениям перемещений торца фланца шпиндельной головки станка по оси Z . Измерения осуществлялись в течение 240 минут с интервалом времени от 5 до 20 минут. Меньшие значения интервала времени использовались для первого часа измерений.

На рис. 1 представлены результаты серии экспериментов, проведенной на холостом ходу для указанных выше пяти частот вращения шпинделя. Семейства экспериментальных характеристик $\delta(t)$, пронумерованных с 1 (1') по 10 (10'), организованы для разных моментов времени работы станка: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 120, 180 и 240 минут и двух различных начальных

температурах проведения экспериментов (в пределах 3 °С), так как станок не находился в термостатном помещении. Анализ экспериментальных характеристик показал, что при различных начальных температурах фиксировался разброс экспериментальных данных в пределах 8 мкм.

Представление о сходимости результатов измерений, полученных двумя способами (без использования измерительного щупа и с его применением) дает рис.2.

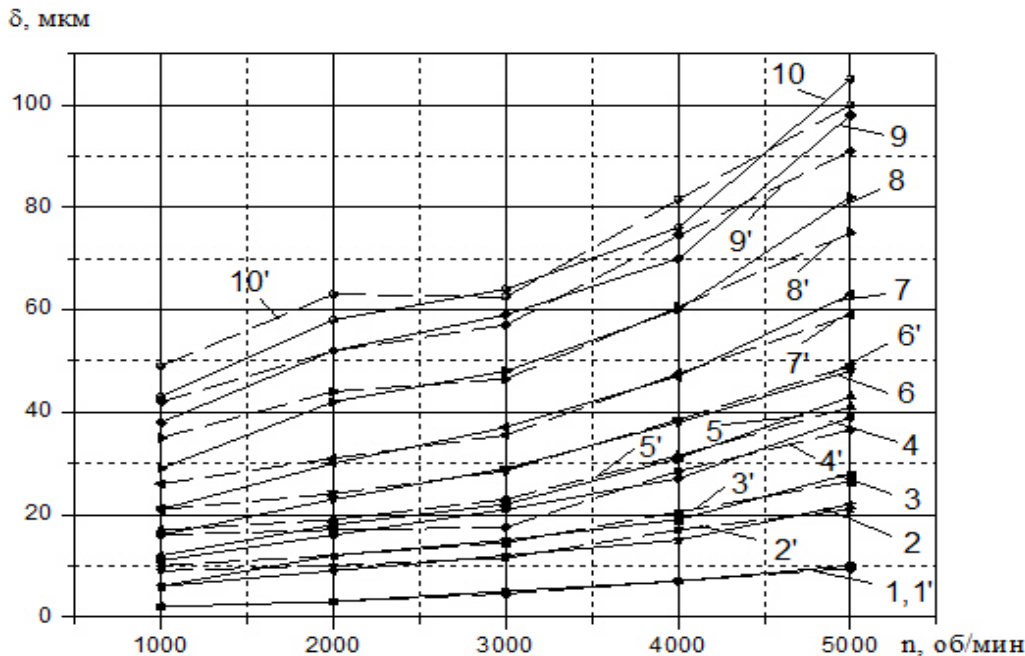


Рис. 1. Семейства экспериментальных характеристик $\delta(n)$

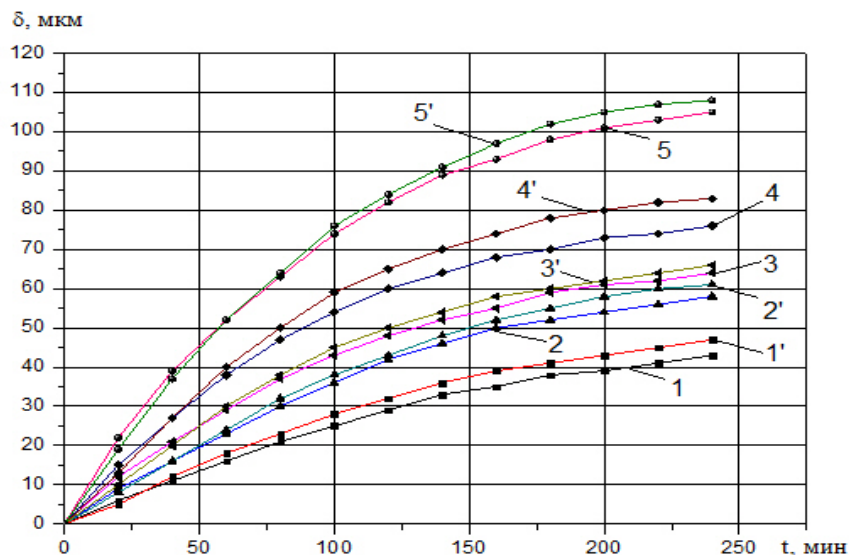


Рис. 2. Тепловые характеристики $\delta(t)$, полученные с использованием двух способов измерений

Характеристики $\delta(t)$ с 1 по 5 представляют измеренные перемещения торца фланца шпиндельной головки, зафиксированные для пяти частот вращения шпинделя. Соответственно характеристики $\delta(t)$ с 1' по 5' получены по результатам измерений базовой поверхности детали с использованием измерительного щупа TC50.

Предельное расхождение корреспондирующих данных были зафиксированы в пределах

8 мкм, что не превысило 10 % от максимальных зафиксированных перемещений на соответствующей частоте вращения шпинделя. Это означает, что исходные данные в виде совокупности экспериментальных значений перемещений могут быть сформированы любым из рассмотренных выше способов, так как их достоверность доказана и значения сопоставимы.

Для подтверждения эффективности разработанной методики и алгоритмов коррекции температурной погрешности станка с ЧПУ был проведен натурный эксперимент на предварительно обработанной детали со ступенчатой поверхностью. Относительная высота ступеньки составляла 0,5 мм, ширина ступени – 5 мм. Ступенчатая поверхность позволяет наиболее точно и удобно произвести концевое фрезерование в отдельные моменты времени с фиксированным интервалом. Ранее проведенные эксперименты для данного

станка показали, что временной интервал, равный 20 минут, обеспечивает заметное изменение температурной погрешности станка, превышающее погрешность измерений.

Для оценки температурной погрешности станка, проявляющейся во времени были отфрезерованы поперек ступенчатой поверхности шесть поверхностей (рис. 3). Базовая глубина фрезерования, задаваемая в УП на каждой ступеньке, также составляла 0,5 мм (без учета коррекции и температурной погрешности).

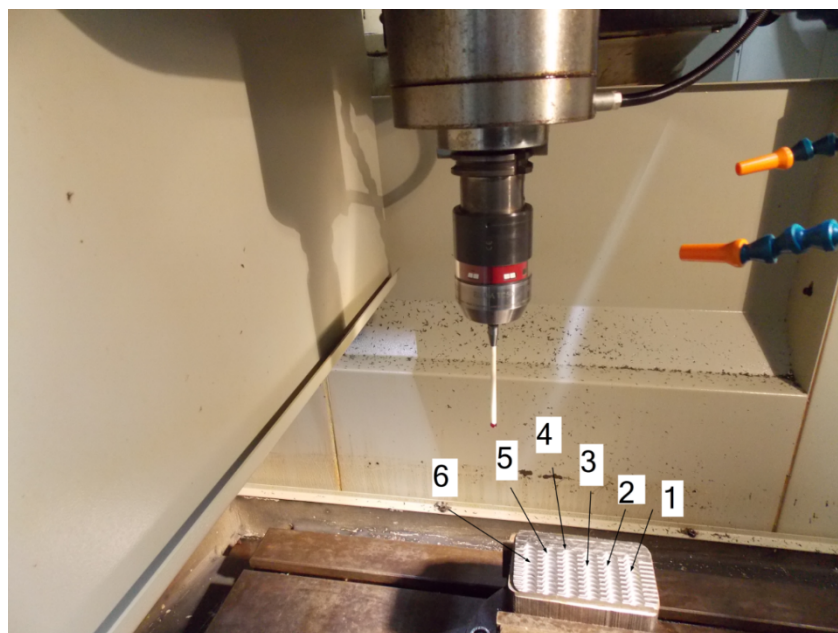


Рис. 3. Контрольная деталь на станке 400V и измерительный щуп TC50

Первая поперечная ступенчатая поверхность принималась за эталон. Вся обработка занимала 20 секунд. За это время температурная погрешность сформироваться не успевала. Вторая поперечная ступенчатая поверхность формировалась уже с учетом образования температурной погрешности. При формировании этой поверхности использовалась временная задержка перед фрезерованием каждой ступени равная 20 мин. Временная задержка позволяла сформировать величину температурных перемещений рабочих органов станка. Все последующие ступенчатые поверхности были сформированы с учетом коррекции температурной погрешности станка. Они формировались аналогично второй поверхности, но для различных температурных условий проведения эксперимента.

Особенностью формирования шестой поверхностью являлось то, что до обработки шестой поверхности с помощью измерительного щупа была выполнена коррекция положения базовой плоскости. Эксперимент проводился в разные дни с несущественно различающимися начальными температурными условиями, поэтому расхождение экспериментальных данных

для ступеней с третьей по шестую не превысили 5 мкм. Контрольные измерения обработанных поверхностей, проведенных на координатно-измерительной машине Wenzel XOrbit 55, показали, что расхождение экспериментальных данных не превысили 3 мкм. Для иллюстрации эффективности предложенной методики и разработанных алгоритмов коррекции температурной погрешности станка на рис. 4 представлены результаты измерений погрешности обработки по оси Z, выполненных на трех поверхностях вдоль оси Y. Представленные на рисунке 4 кривые образованы соединением отдельных точек отрезками. Первая кривая 1 сформирована на эталонной поверхности. Кривая 2 сформирована на второй поверхности в последний интервал времени проведения натурального эксперимента с максимальной температурной погрешностью. Кривая 3 сформирована на третьей поверхности, полученной при реализации алгоритмов коррекции температурной погрешности станка.

Обсуждение. Для исключения возможных ошибок измерения, вызываемых некорректностью работы измерительной

аппаратуры при использовании в режиме реального времени измерительного щупа, в УП следует предусмотреть *модуль проверки измеренных данных*. Алгоритм программно реализованного такого модуля представлен на рис. 5. Управляющая программа, реализующая модуль проверки измеренных данных, включает пять блоков.

Первый блок – *блок начальных данных* включает: загрузку измерительного щупа в шпиндель станка; активацию рабочей системы координат детали; позиционирование шпинделя в фиксированной позиции в рабочем пространстве станка для выполнения процедуры измерения; инициализацию необходимых параметров управляющей программы.

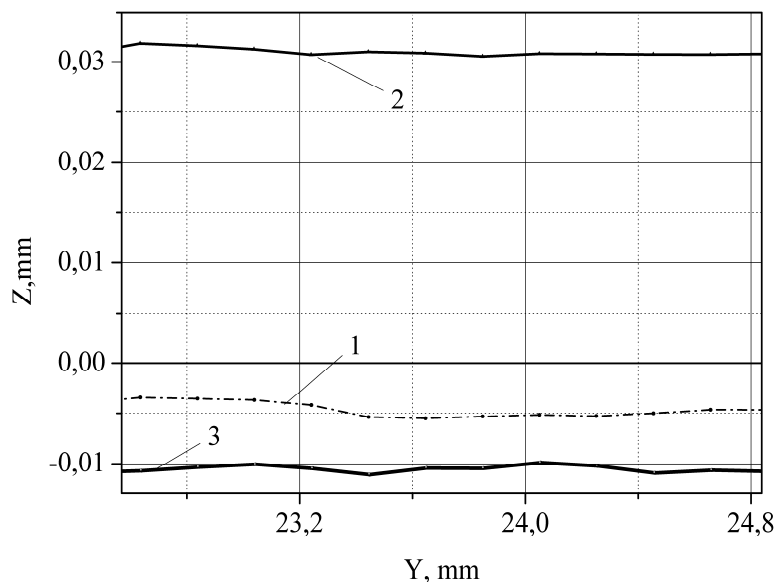


Рис. 4. Фрагмент результатов измерений на трех поверхностях

Второй блок – *блок суммирования* счетчика выполнений процедуры измерения *NBL++*.

Третий блок – *блок измерений*, в котором реализуется процедура измерения базовой поверхности. Для использованного в исследовании измерительного щупа TC50 в качестве специализированного программного обеспечения, позволяющего распознавать сигналы, поступающие от измерительного щупа, используются «измерительные циклы», представляющие собой текстовые модули специализированных подпрограмм: BL9700, BL9701, BL9702, BL9703, BL9704, BL9705, BL9706, BL9707. Тип измерительной задачи определяет систему ненулевых параметров соответствующей подпрограммы. Основной подпрограммой, вызываемой непосредственно из управляющей программы для станка с ЧПУ, является BL9700 с максимальным числом передаваемых параметров, равным 16.

Четвертый блок – *блок оценки достоверности измерений*, в котором устанавливается достоверность измерения и выбирается вариант дальнейшего исполнения управляющей программы. Измеренное значение определяет корректирующие воздействия, обрабатываемые в режиме реального времени в рабочей УП. Недостоверное значение, полученное при измерении, может привести или к останову технологического

перехода или поломке станка. Специфической особенностью измерительных циклов для щупов серии TC50 является использование предопределенных переменных пользователя или R-параметров для систем ЧПУ Sinumerik. Измеренное значение по оси Z сохраняется в параметре «R[02]». Предельное значение температурного перемещения δ устанавливается заранее и может отличаться от измеренного значения более чем на 100 %, но не на несколько порядков.

Пятый блок – *блок завершения*, в котором принимается решение о завершении технологического перехода измерений. Заранее, из практики использования данного измерительного щупа, устанавливается пороговое значение числа контрольных измерений *N*, позволяющих гарантировать достоверность измерения. Это число обязательно больше двух. Длительность одного повторяющегося измерения составляет не более 3 с.

Реализация ОММ-технологии в механообработке может быть осуществлена без использования дополнительных прогнозных моделей. В этом случае реализуется другой алгоритм формирования корректирующих воздействий температурной погрешности станка, при котором коррекция выполняется на основании только результатов измерений без прогнозируемых значений

температурных перемещений рабочих органов станка.

В заключение дискуссии хотелось бы остановиться на некоторых особенностях завершающего этапа предлагаемой методики – это модификация УП. Схема работы программы представлена на рис.6. Используемая в методике управляющая программа для станка с ЧПУ имеет четыре принципиальных отличия от типовой программы.

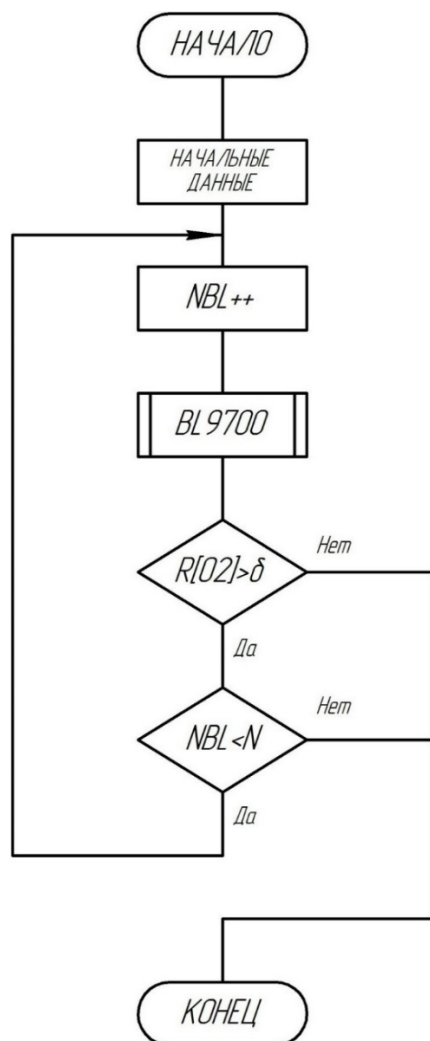


Рис. 5. Алгоритм модуля проверки измеренных данных

Первое отличие. Число циклов обработки детали $NCLN$ (рис.6) больше, чем в типовой, так как в этом случае добавляются измерительные переходы. Количество измерительных переходов определяется прогнозируемой интенсивностью температурной погрешности станка.

Второе отличие. Отработка корректирующих смещений рабочих органов станка выполняется только при условии выполнения ограничений:

$$\Delta \leq \varepsilon, \quad (2)$$

где Δ – измеренная погрешность (по модулю), мкм; ε – установленный технологией обработки допуск размера, мкм.

Если величина корректирующих смещений, установленная по результатам измерений, больше требуемого допуска на фиксированный размер, то процесс обработки завершается, так как уже фиксируется брак. В противном случае осуществляется переход к исполнению второго блока алгоритма.

Чтобы не доводить до брака обрабатываемую деталь следует предельное значение температурной погрешности ε' устанавливать несколько меньше, чем значение допуска на размер:

$$\varepsilon' = r \cdot \varepsilon, \quad r \in [0, \dots, 1], \quad (3)$$

где r – коэффициент запаса.

Установленное предельное значение температурной погрешности ε' может привести к изменению общего числа циклов обработки.

Третье отличие. Управляющая программа для станка с ЧПУ реализуется двумя вложенными циклами. Внешний цикл определяется технологическими переходами, предусмотренными технологией обработки детали, а также дополнительными циклами, обусловленными результатом работы АСРКВ. Циклы $Cycle_{in}$ – это исполнение обработки детали без измерения при выполнении условия:

$$\Delta_{np} \leq \varepsilon', \quad (4)$$

где Δ_{np} – прогнозируемое значение температурной погрешности станка.

В этом случае отработка корректирующих воздействий приводами станка осуществляется в пределах внутреннего цикла.

Четвертое отличие. Алгоритм коррекции температурной погрешности станка предусматривает дополнительный блок *Пересчет коррекции*, в котором производится автоматический пересчет корректирующих воздействий. Так, например, при отработке внутреннего цикла реализуются корректирующие воздействия типа (1), приводящие к некоторому прогнозируемому значению погрешности Δ_{np} . В тоже время в результате измерения неизбежно фиксируется отклонение фактической температурной погрешности станка Δ от прогнозируемой Δ_{np} .

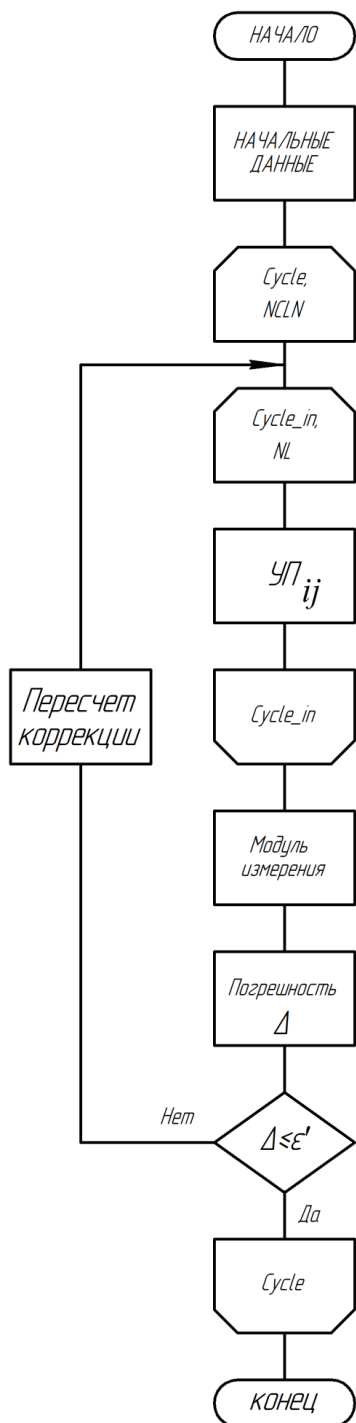


Рис. 6. Схема работы управляющей программы для станка с ЧПУ

В блоке *Пересчет коррекции* для исключения установленной погрешности β осуществляется пересчет корректирующих воздействий на текущий момент времени.

$$\beta = |\Delta_{np} - \Delta|. \quad (5)$$

Анализ результатов измерений обработанных поверхностей, представленных на рисунке 4, показал, что после 240 минут нагревания станка температурная погрешность составила около 37 мкм при измерении на координатно-измерительной машине и 39 мкм при измерении на станке с

использованием измерительного щупа. Применение алгоритмов коррекции температурной погрешности позволило её сократить практически до 10 мкм. Для получения большей точности обработки требовалась более точная настройка алгоритмов коррекции, например, за счет введения дополнительных измерительных переходов при обработке.

Выводы. Таким образом, в статье представлена методика практической реализации алгоритмов компенсации температурной погрешности станка с ЧПУ. Методика содержит семь основных этапов, методологически охватывающих четыре области работ: экспериментальную; программно-математическую, связанную с аппроксимацией экспериментальных характеристик; измерительную и подготовку управляющих программ для станков с ЧПУ, реализующую ОММ-технологии и алгоритмы коррекции температурной погрешности станков с ЧПУ. Доказано, что представленная методика позволяет разработать для любого станка индивидуальную автоматизированную систему компенсации возникающей температурной погрешности. Важнейшими факторами эффективности предлагаемой методики являются полнота экспериментальной базы и точность настройки алгоритмов коррекции температурной погрешности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nishiwaki N., Hori S., Sugiura Y. Study on Thermal Deformation of Machine Tool Estimated by its Basic Characteristics. In: Kochhar A.K. et al. (eds) Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference. Palgrave, London. 1997, pp. 615–620. doi:10.1007/978-1-349-14620-8_97
2. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E. et al. Thermal Issues in Machine Tools. Annals of the CIRP 61(2). 2012. Pp.771–792.
3. Cao H., Zhu L., Li X. et al. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation. Int J Adv Manuf Technol, 2016, vol. 86, issue 5–8, pp 1739–1751. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8314-5>
4. Zhou Z.D., Gui L., Tan Y.G. et al. Actualities and Development of Heavy-Duty CNC Machine Tool Thermal Error Monitoring Technology. Chin. J. Mech. Eng. 2017. Vol. 30, Issue 5, pp 1262–1281. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0166-5>
5. Wang S., Zhou B., Fang C. et al. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools. Int J Adv Manuf Technol. 2017. Volume 91, Issue 1–4, pp. 577–587. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9442-2>.
6. Putz M., Richter C., Regel J. et al. Industrial

consideration of thermal issues in machine tools. *Prod. Eng. Res. Devel.* 2018. 12: 723. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0848-6>

7. Aguado S., Santolaria J., Samper D. et al. Protocol for machine tool volumetric verification using commercial laser tracker. *Int J Adv Manuf Technol* (2014) 75: 425. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6055-5>

8. Aguado S., Samper D., Santolaria J. et al. Machine Tool Rotary Axis Compensation Through Volumetric Verification Using Laser Tracker. *Procedia Engineering*, Volume 63, 2013, Pages 582-590, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.189>.

9. He G., Huang, X., Ma W. et al. CAD-based measurement planning strategy of complex surface for five axes on machine verification. *Int J Adv Manuf Technol* (2017) 91: 2101. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9932-2>

10. Lee E.S., Lee C.H., Kim S.C. Machining Accuracy improvement by Automatic Tool Setting and On Machine Verification // *Key Engineering Materials*. 2008. Vol. 381–382. Pp. 199-202.

11. Kim S.H., Ko T.J., Ahn J.H. Elimination of Settling Error Due to Clamping Forces in On-Machine Measurement // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002. Vol. 19. Issue 8. Pp. 573–578.

12. Choi J.P., Min B.K., Lee S.J. Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on

machine measurement and error compensation system // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 155–156. Pp. 2056–2064.

13. Ibaraki S., Intani T. Matsushita T. Calibration of location errors of rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012. Vol. 58. Pp. 44–53.

14. Chen F.J., Yin S.H., Huang H., Ohmori H, Wang Y., Fan Y.F., Zhu Y. J. Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010. Vol. 50. Issue. 5. Pp. 480-486.

15. Huang N., Bi Q., Wang Y, Sun C. 5-Axis adaptive flank milling of flexible thin-walled parts based on the on-machine measurement // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2014. Vol. 84. Pp. 1–8.

16. Поляков А.Н., Гончаров А.Н. Автоматизированная система коррекции температурной погрешности станков с ЧПУ // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. 2016. № 2 (227). С. 33–41.

17. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Марусич К.В., Романенко К.С. Экспериментальные исследования статических и тепловых характеристик станка с ЧПУ // *СТИН*. 2014. №6. С.13–18.

Информация об авторах

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: anp_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Гончаров Антон Николаевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: ang_osu_aki_tmmsk@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Парфёнов Игорь Валентинович, кандидат технических наук, доцент, декан факультета дистанционных образовательных технологий. E-mail: ivparfenov@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила в январе 2019 г.

© Поляков А. Н., Гончаров А.Н., Парфёнов И. В., 2019

¹Polyakov A.N., ¹Goncharov A.N., ^{1,*}Parfenov I.V.

¹Orenburg State University

Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13

**E-mail: ivparfenov@mail.ru*

TECHNIQUE FOR CORRECTION OF CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR

Abstract. *The work is devoted to the issue of ensuring the accuracy of processing on machine tools with numerical control due to the correction of the temperature error. The construction of a system for correcting the temperature error of a tool using the automatic part measurement of device is considered.*

Analysis of various sources shows the method for correcting machining errors, caused by static and dynamic factors and based on the technology of automatic measurement of the part on the machine is considered in the literature. However, the issues of correction the temperature error using the technology of automatic measurement of tool parts in the open press are presented insufficiently for practical implementation. Therefore, this paper presents the developed methodology for the practical implementation of control algorithms for machine tool working elements that compensate its temperature error using automatic part measurement technology. The methodology contains seven main stages, covering four areas of work: experimental; mathematical program; measurement and preparation of control programs for machine tools with numerical program control. It is proved that the presented method allows developing an individual automated system for correcting the resulting temperature error for any machine. The most important areas for increasing the efficiency of such a system are to ensure the completeness of the experimental base and the accuracy of setting algorithms for correcting the temperature error of the machine.

Keywords: method, temperature error of the machine, thermal characteristics, measuring probe, OMM technology, control program.

REFERENCES

1. Nishiwaki N., Hori S., Sugiura Y. Study on Thermal Deformation of Machine Tool Estimated by its Basic Characteristics. In: Kochhar A.K. et al. (eds) Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference. Palgrave, London, 1997, pp. 615–620. doi:10.1007/978-1-349-14620-8_97
2. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E. et al. Thermal Issues in Machine Tools. *Annals of the CIRP* 61(2), 2012, pp.771–792.
3. Cao H., Zhu L., Li X. et al. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation. *Int J Adv Manuf Technol*, 2016, vol. 86, issue 5–8, pp. 1739–1751. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8314-5>
4. Zhou Z.D., Gui L., Tan Y.G. et al. Actualities and Development of Heavy-Duty CNC Machine Tool Thermal Error Monitoring Technology. *Chin. J. Mech. Eng.* 2017, vol. 30, issue 5, pp. 1262–1281. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0166-5>
5. Wang S., Zhou B., Fang C. et al. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, vol. 91, Issue 1–4, pp. 577–587. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9442-2>
6. Putz M., Richter C., Regel J. et al. Industrial consideration of thermal issues in machine tools. *Prod. Eng. Res. Devel.* 2018, 12: 723. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0848-6>
7. Aguado S., Santolaria J., Samper D. et al. Protocol for machine tool volumetric verification using commercial laser tracker. *Int J Adv Manuf Technol* (2014) 75: 425. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6055-5>
8. Aguado S., Samper D., Santolaria J. et al. Machine Tool Rotary Axis Compensation Through Volumetric Verification Using Laser Tracker. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 63, pp. 582–590, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.189>.
9. He G., Huang X., Ma W. et al. CAD-based measurement planning strategy of complex surface for five axes on machine verification. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 91: 2101. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9932-2>
10. Lee E.S., Lee C.H., Kim S.C. Machining Accuracy improvement by Automatic Tool Setting and On Machine Verification. *Key Engineering Materials*, 2008, vol. 381–382, pp. 199–202.
11. Kim S.H., Ko T.J., Ahn J.H. Elimination of Settling Error Due to Clamping Forces in On-Machine Measurement. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002, vol. 19, issue 8, pp. 573–578.
12. Choi J.P., Min B.K., Lee S.J. Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on machine measurement and error compensation system. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, vol. 155–156, pp. 2056–2064.
13. Ibaraki S., Intani T. Matsushita T. Calibration of location errors of rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, vol. 58, pp. 44–53.
14. Chen F.J., Yin S.H., Huang H., Ohmori H, Wang Y., Fan Y.F., Zhu Y. J. Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol.50, Issue. 5, pp. 480–486.
15. Huang N., Bi Q., Wang Y, Sun C. 5-Axis adaptive flank milling of flexible thin-walled parts based on the on-machine measurement. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, vol. 84, pp. 1–8.
16. Polyakov A.N., Goncharov A.N. Automated system for the correction of temperature errors of CNC machine tools. *The Directory. Engineering journal with the app*. 2016, no. 2 (227), pp. 33–41.
17. Polyakov A.N., Goncharov A.N., Marusich K.V., Romanenko S.K. Experimental study of the static and thermal characteristics of CNC machine. *STIN*, 2014, no. 6, pp. 13–18.

Information about the authors

Polyakov, Aleksandr N. DSc, Professor. E-mail: anp_temos@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Goncharov, Anton N. Ph.D, Senior lecturer. E-mail: ang_osu_aki_tmmsk@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Parfenov, Igor V. PhD, Assistant professor. E-mail: ivparfenov@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Received in January 2019

Для цитирования:

Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Парфёнов И.В. Методика коррекции температурной погрешности станка с ЧПУ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 117–127. DOI: 10.34031/article_5ca1f634ef76c8.31770383

For citation:

Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfenov I.V. Technique for correction of cnc machine tool temperature error. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 117–127. DOI: 10.34031/article_5ca1f634ef76c8.31770383