

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОКАРНОГО СТАНКА С ЧПУ

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований термодинамического состояния токарного станка с ЧПУ мод.16В16Т1. Целью данного исследования являлось установление термодинамического состояния станка на разных режимах работы холостого хода станка. Эксперимент выполнялся для трех частот вращения шпиндельного узла: 200 мин^{-1} , 800 мин^{-1} и 2000 мин^{-1} . Значения температуры и перемещений по осям X и Y фиксировались как при нагреве, так и остывании станка. Зафиксированы два эффекта "температурный всплеск" – после останова ШУ и "температурный провал" – при повторном его включении.

Необходимость создания конкурентоспособных станков вызывает потребность в обеспечении их теплоустойчивости, что является обязательным условием для достижения требуемой точности и надежности выпускаемого оборудования.

Для тепловых испытаний следует выделить следующие специфические особенности:

- 1) большая продолжительность во времени;
- 2) для достоверности формирования представления о тепловом состоянии станка необходима проведение измерения в большом количестве точек.

Эти особенности определяют ценность в литературе экспериментальной информации о проводимых тепловых испытаниях. Особенно значимой эта информация становится в сложившихся экономических условиях.

Основными задачами проведенного эксперимента являлись: установление теплового и деформационного состояния станка при его нагреве на различных частотах вращения станка; оценка модальности температурного поля станка; установление изменения теплового и деформационного состояния станка при останове и повторном включении ШУ.

Эксперимент проводился при следующей схеме работы станка:

- 1) задавались три частоты вращения ШУ $n=200$, 800 и 2000 мин^{-1} ;
- 2) по истечении времени температурной стабилизации или близкому к нему производился останов ШУ и повторное включение.

Измерение температур производилось при помощи многоканального устройства, выполненного по схеме одноканального цифрового термометра с точностью измерения $\pm 0,2^\circ \text{C}$. Прибор оснащен одиннадцатью термодатчиками, в качестве которых использовались кремниевые диоды.

Измерения температур выполнялись в два этапа. На первом этапе анализировался характер распределения температур на крышках подшипников в передней и задней опорах. На втором этапе анализировался характер распределения температур в точках, принадлежащих различным конструктивным элементам станка.

Температура технической среды имела существенный диапазон. Этот диапазон составлял не менее 5% от начальной температуры.

Результаты экспериментальных исследований первого этапа для двух частот вращения ШУ $n=200$ и $n=800 \text{ мин}^{-1}$ приведены на рисунках 1 и 2. Рисунки включают по четыре кривых, иллюстрирующих температурное состояние в четырех точках станка. Термодатчики 1 и 2 устанавливались на подшипниковой крышке задней опоры ШУ, а датчики 3 и 4 – на передней крышке. Термодатчики 1 и 3 располагались в верхних точках крышек, а 2 и 4 – в нижних. Остальные термодатчики 5 – 8 также располагались на крышках задней и передней опор между датчиками 1 – 4, соответственно.

Анализ полученных экспериментальных результатов позволил сделать следующие выводы.

Прогрев задней опоры, на малых частотах

тах вращения ШУ более существенен, чем в передней. Для средних и больших частотах вращения передняя опора прогревается больше, чем задняя. Этот эффект объясняется следующим образом: на малых частотах существенно влияние ременной передачи, используемой в качестве приводного элемента ШУ. На средних и больших частотах вращения ШУ, нагрузка от натяжения ремня не оказывает заметного влияния на тепловыделения в задней опоре. В этом случае в большей степени проявляются гидродинамические зависимости потерь в опорах.

На всех режимах работы ШУ отслеживалась асимметрия температурного поля подшипников. На всех режимах работы ШУ нагрев верхних частей подшипниковых крышек был больше, чем нижних. Асимметрия - результат качества сборки подшипников, т.к. эксперимент выполнялся на холостом ходу.

На всех частотах вращения после останова ШУ наблюдался "температурный всплеск". Этот температурный всплеск объясняется скачкообразным изменением термодинамического состояния станка, обусловленного внезапным изменением условий конвективного теплообмена. После останова ШУ все теплоотдающие поверхности станка находятся в условиях только естественной конвекции и коэффициенты теплоотдачи, количественно описывающие конвективный теплообмен, уменьшаются в несколько раз. Значительное уменьшение коэффициентов теплоотдачи отдельных теплоотдающих поверхностей станка вызывает существенное увеличение времени температурной стабилизации и повышение уровня нагрева, что хорошо описывается решением уравнения нестационарной теплопроводности с использованием модального подхода:

$$T_i = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \varphi_{ik} \varphi_{jk} f_j \text{diag}(1 - \exp(-\lambda_k t) / \lambda_k) + \sum_{k=1}^n \varphi_{ik} u_{ok} \exp(-\lambda_k t)$$

где - элементы матрицы собственных векторов, λ_k - соответствующие собственные значения, u_{ok} - элементы вектора u_o , определяемые начальными условиями термодинамической системы, $\text{diag}()$ - обозначение диагональной матрицы, f_j - элементы вектора тепловой нагрузки, n - число узлов расчетной схемы.

На втором этапе исследований, измерения выполнялись в одиннадцати точках, что соответствовало максимальному числу установ-

ленных термодатчиков. Результаты экспериментальных исследований проиллюстрированы рисунками 3 и 4 для предельной частоты вращения ШУ - 2000 мин⁻¹. Кривые на рисунке 3 соответствуют показаниям соответствующих датчиков. Термодатчики устанавливались следующим образом: шпиндельная бабка - 2; направляющие станины вблизи бабки - 1 и 7; станина - 4 и 8; крышки шпиндельных опор - 6 (задняя опора) и 5 (передняя опора); пустотелая тумба, на которой установлена станина - 3, 10 и 11; электродвигатель привода главного движения - 9.

Анализ полученных результатов позволяет сформулировать следующее представление о тепловом состоянии станка. Как и следовало ожидать, наиболее нагретыми оказались точки 5 и 6, находившиеся в непосредственной близости от основных источников генерации тепла - роликовых опор. Перегрев передней опоры по отношению к задней, составлял более 4°С, при средней температуре окружающей среды в 22°С. Следующим наиболее нагретым элементом была шпиндельная бабка. Ее тепловое состояние представлял датчик 2, установленный на лицевой стенке бабки, вблизи стыка со станиной. Расхождение в уровне нагрева относительно передней подшипниковой крышки составляло более 10°С вблизи установившейся температуры. Двигатель 9 имел температуру меньшую, более чем на 10°С по сравнению с нагревом бабки. Меньше всего нагревалась пустотелая тумба. Ее избыточная температура в разных точках составляла от десятых долей градуса до 10°С (вблизи коробки скоростей и двигателя привода главного движения). Показания датчиков 1, 7 и 8 практически не отличались, поэтому для лучшей визуализации представления на рисунке 3 приведены лишь показания для восьмого датчика. Здесь, необходимо несколько слов сказать о модальности температурного поля, особенно отчетливо представленной температурными характеристиками точек, принадлежащих различным элементам станка. Модальность температурного поля заключается в формировании температуры в каждой точке станка, учитывающей воздействие от всех элементов станка. Это влияние существенно различается в зависимости от структурного расположения в станке (структурное расположение - положение анализируемого температурного состояния точки станка по отношению к источникам тепла и теплоотдающим поверхностям, а также ее принадлежность определенному конструктивному элементу

станка). Визуальное проявление модальности температурного поля заключается в различии времени температурной стабилизации или величины тепловой постоянной времени в различных точках станка. Так подшипниковая крышка передней опоры 6 имела наименьшую тепловую постоянную времени, определяемую на уровне 20 минут. Крышка задней опоры – около 45 минут. Шпиндельная бабка – около 60 минут. Для шпиндельной бабки особенно четко проявился эффект “запаздывания”, оцениваемый в 12-14 минут. Что связано с особенностями формирования теплового источника для шпиндельной бабки. “Запаздывание” устанавливается по температурной характеристике, как функции температуры во времени. Для запаздывания характерно наличие вогнутого участка кривой. Для шпиндельной бабки основным источником, бесспорно, являлись опоры. Но “запаздывание” проявилось из-за удаленности точки измерения от источников тепла. Поэтому, тепло доставлялось в эту точку путем сложного теплообмена: по стенкам бабки, через прогреваемый воздух внутри бабки и через нагретое масло, используемое как для смазывания опор, так и зубчатых колес. Учитывая, что в станке 16Б16Т1 используется циркуляционная система смазки, поэтому требуется некоторое время, чтобы масло успело существенно нагреться и в коробке собралось достаточное его количество для прогрева стенок бабки. Такой эффект наблюдается и в двусторонних торцешлифовальных станках. Так как в них основным источником генерации тепла выступает нагретая СОЖ, поэтому время запаздывания полностью определяется временем формирования теплового источника. Первые минуты работы станка фактически связаны с формированием источника тепла. Для других элементов станка (двигатель 9 в данном случае не принимается в расчет, т.к. он сам являлся источником тепла) ярко эффект запаздывания не проявлялся, в силу небольшого нагрева и больших постоянных времени, что характеризует длительность процесса нагревания.

На втором этапе исследований также фиксировался “температурный всплеск”. На больших частотах вращения он выражался более ярко. Так для $n=2000$ мин на передней подшипниковой крышке он составлял более 3°C . Что-

бы оценить изменение теплового состояния станка при повторном нагреве, что реально происходит в производственных условиях работы оборудования, после 20 минут останова ШУ, шпиндельный узел был запущен вновь, на той же частоте. При этом оказалось, что самые нагретые точки станка 2, 5 и 6 не успели вернуться к прежнему температурному состоянию - состоянию до останова ШУ. Все другие точки станка – точки 1, 3, 4, 7, 8, 9, 10 и 11, ввиду существенного для них “температурного всплеска”, имели температурное состояние через 20 минут после повторного запуска ШУ с большим уровнем нагрева. Это объясняется тем, что при повторном включении привода главного движения, наблюдался эффект, противоположный “температурному всплеску” и названный “температурным провалом”. Для “температурного провала” характерно остывание точек станка во время повторного включения ШУ. Этот эффект объясняется аналогично эффекту “температурного всплеска”.

Помимо температур в эксперименте отслеживались перемещения подшипниковой крышки передней опоры ШУ по осям X и Y (рисунок 4). Измерения выполнялись с помощью многооборотных индикаторных головок с ценой деления 2 мкм. Здесь следует отметить, что уже после 100 минут работы станка перемещения по осям не претерпевали изменений. На перемещениях не отражались эффекты температурного всплеска и провала. Максимальные перемещения составили по оси Y – более 100 мкм, а по оси X – 80 мкм.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1) на холостом ходу, на инструмент через тумбу станка тепловыделения не оказывают заметного влияния. Возникающие изменения начального термомодеформационного состояния инструмента могут быть связаны лишь с изменением температуры технической среды.

2) эффекты “температурного всплеска” и “температурного провала” могут быть использованы для выравнивания теплового и деформационного состояния станка, причем путем рационального сочетания остановов и повторных прогревов можно добиться скорейшего выравнивания теплового и деформационного состояния оборудования.

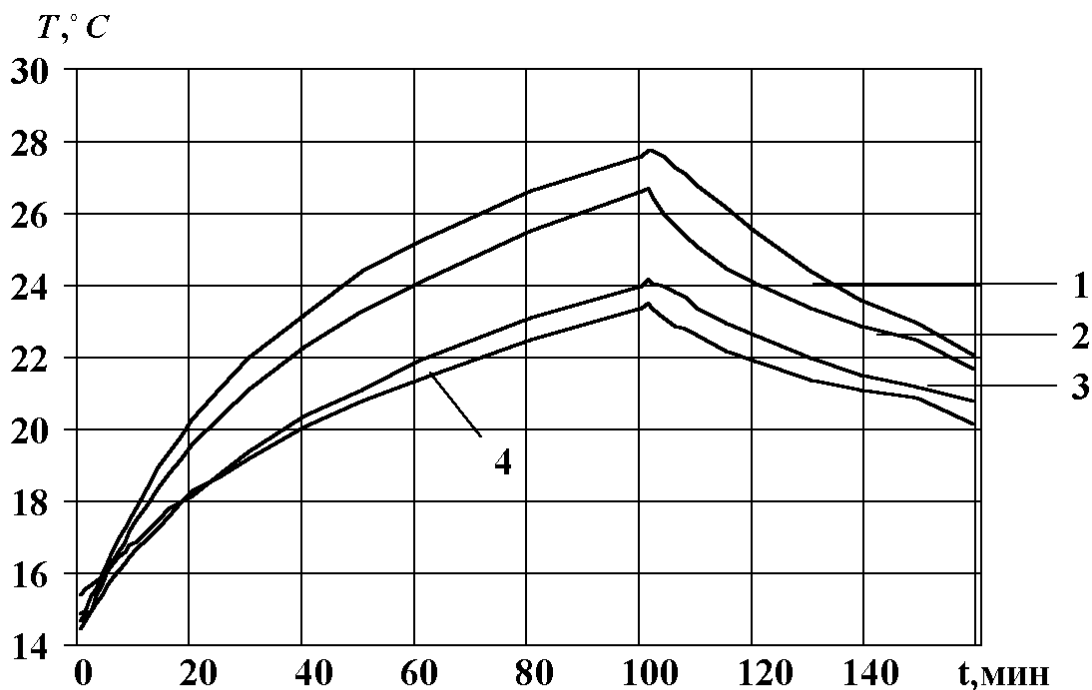


Рисунок 1 - Экспериментальные температурные характеристики в точках 1 - 4 при частоте вращения 200 мин^{-1} , останов ШУ после 100 мин. работы.

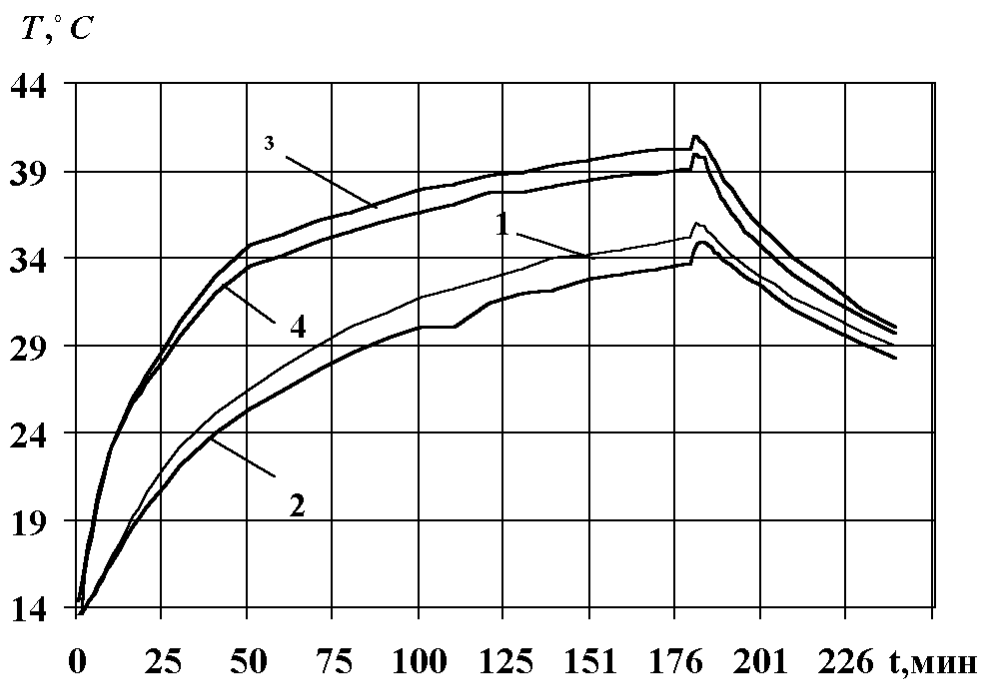


Рисунок 2 - Экспериментальные температурные характеристики в точках 1-4 при частоте вращения шпинделя 800 мин^{-1} , останов ШУ после 180 мин. работы.

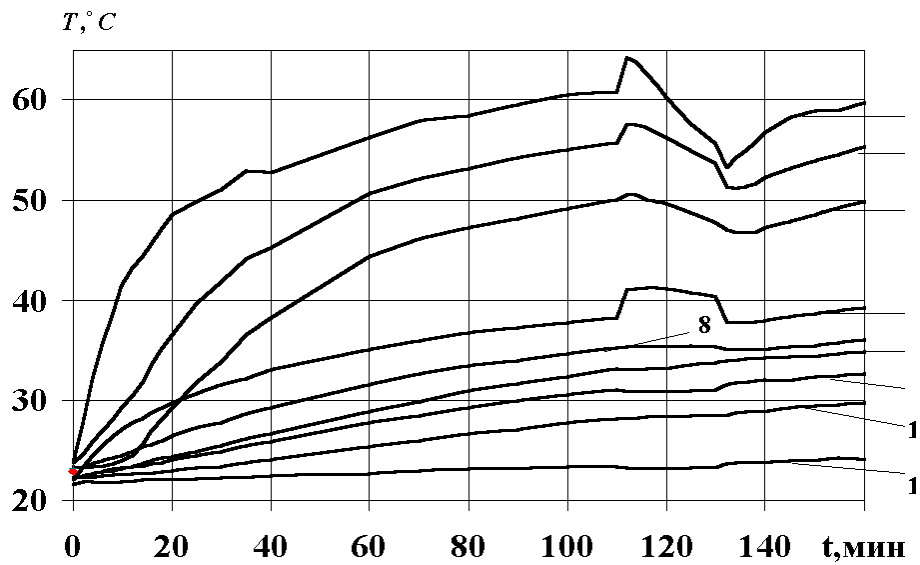


Рисунок 3 - Экспериментальные температурные характеристики в различных точках при $n=2000 \text{ мин}^{-1}$. Нагрев до 110 мин., остывание - 20 мин., повторный нагрев - 30 мин.

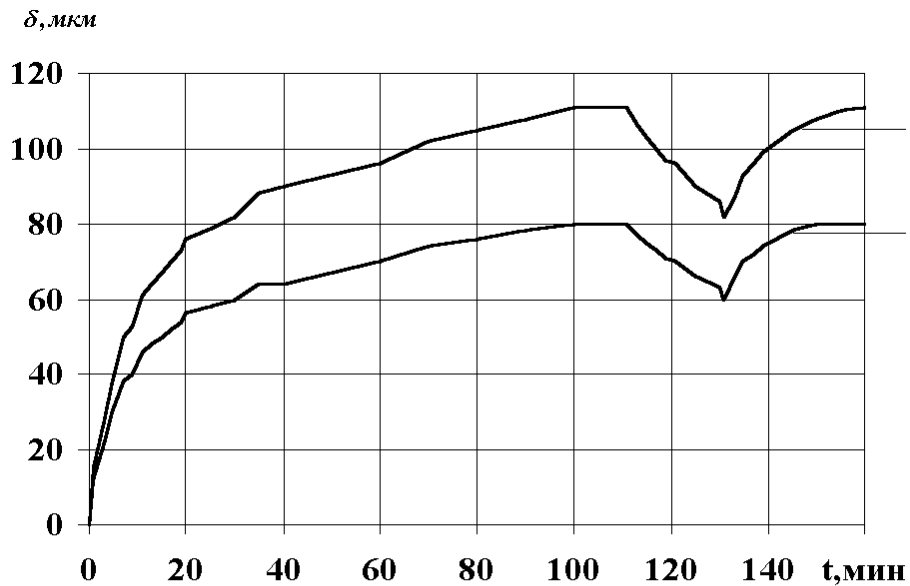


Рисунок 4 - Экспериментальные характеристики перемещений по осям X и Y станка мод. 16Б16Т1. Нагрев до 110 мин., остывание - 20 мин., повторный нагрев - 30 мин.