



Ключевые слова:

станок,
температура,
тепловые
деформации,
смещения

Keywords:

machine tool,
temperature,
thermal
deformations,
displacements

ОЦЕНКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА

Станислав ЧУРАБО

Рассмотрены неравномерность изменения температуры колонны и шпиндельной бабки станка. Определено влияние неравномерности распределения температуры на результирующие смещения оси шпинделя.

Non-uniformity of temperature change of column and non-uniformity of temperature change of spindle head are considered. The effect of the non-uniformity of temperature distribution on the resulting displacements of the spindle axis is determined.

Любое изменение размеров конструкции станка, вызываемое тепловыми возмущениями, приводит к отклонению характеристик обрабатываемых заготовок от требуемого уровня. Сложный характер тепловых деформаций возникает вследствие изменения режимов работы станка; изменения температуры окружающей среды; конструктивных особенностей станка.

При использовании традиционных моделей станков погрешности обработки, вызываемые тепловыми деформациями, не являлись очень важной проблемой при их конструировании. Однако после того, как в производстве стали использовать станки с ЧПУ и само производство стало в основном автоматизированным, погрешности обработки, вызываемые тепловыми деформациями, стали серьезным фактором, влияющим на точность обработки. Повышение скоростей вращения шпинделя и подач увеличивает количество теплоты, вырабатываемой станком в процессе его эксплуатации. В настоящее время в современном производстве по отношению к точности обработки предъявляются высокие требования, что обуславливает необходимость создания способов сниже-

ния, контроля и управления тепловыми деформациями станка.

В общем балансе точности для различных видов и типов металлорежущих станков удельный вес погрешностей, определяющих и формирующих точность станка, будет различаться. Соотношение долей погрешностей в точности металлорежущего станка, таких как геометрические, кинематические, упругие, динамические, тепловые и др. для станков различных типов и классов точности имеет свои особенности. Это положение хорошо иллюстрируется соотношением этих долей (рис. 1) для ультрапрецизионных станков и высокоскоростных фрезерных обрабатывающих центров [1].

В обрабатывающих центрах (рис. 1) доля погрешностей траекторий перемещений рабочих органов и температурных деформаций значительно возрастает, и особенно этот эффект заметен для температурных деформаций, что обуславливается ростом суммарной энергонасыщенности станка.

Станки с ЧПУ являются более энергоемкими, а доля машинного времени у них достигает 70–90%. В этих станках до 50% энергии, подводимой к станку, рассеивается в нем вследствие электрических

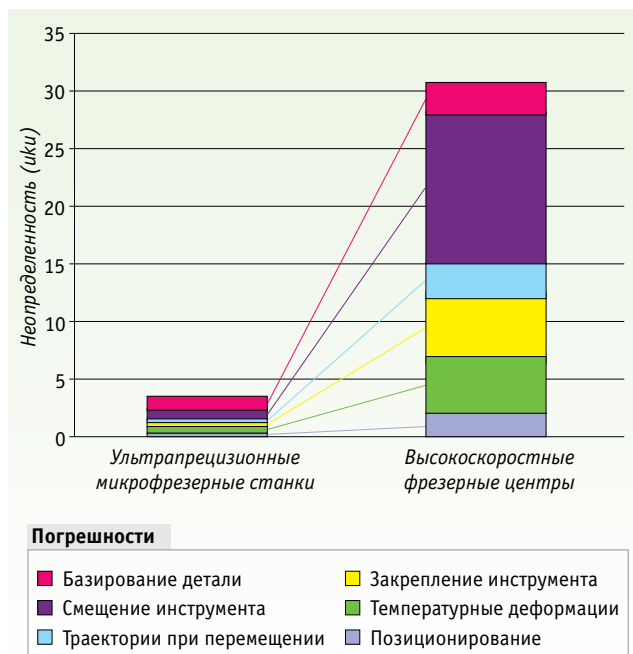


Рис. 1. Соотношение баланса погрешностей точности

и механических потерь и превращается в тепловую, увеличивая теплонапряженность конструкции [2, 3]. Влияние тепловых деформаций особенно заметно при выполнении чистовых операций, при которых погрешности, вызываемые деформацией упругой системы станка, не оказывают существенного влияния на погрешности, возникающие при обработке детали. В работах [3, 4] показано, что тепловые деформации в общем балансе погрешностей обработки достигают 30–70%, причем

характер и степень влияния тепловых деформаций неодинаковы для различных параметров точности обрабатываемых деталей.

Воздействие температурных колебаний является физическим явлением, которое невозможно устранить полностью. К нежелательным эффектам воздействия теплоты относятся изменения геометрии и объема деталей станка. Эти изменения приводят к возникновению смещений инструмента и заготовки относительно друг друга, что, в свою очередь, снижает точность обработки.

Тепловые деформации станков приводят и к линейным, и к угловым смещениям деталей станка.

В целом погрешности являются функциями трех координат: x , y , z . В конструкции станков с последовательной кинематикой координатные оси перпендикулярны друг другу и составляют единую систему координат. На рис. 2 проиллюстрирован принцип влияния тепловых деформаций деталей станка на его параметры точности.

К угловым тепловым погрешностям относятся погрешности наклона, вращения и отклонения.

В общем виде погрешности положения между двумя элементами станка обладают шестью степенями свободы и могут быть представлены схематически, как это показано на рис. 3а [5].

При взаимном прямолинейном перемещении двух рабочих органов в направлениях осей координат 1 и 2, изображенных на рис. 3б, значения величин погрешностей точности перемещения, приведенных к положению, например вершины режущего инструмента, будут определяться как разность фактического и идеального геометрических положений точки в выбранной системе координат [5].

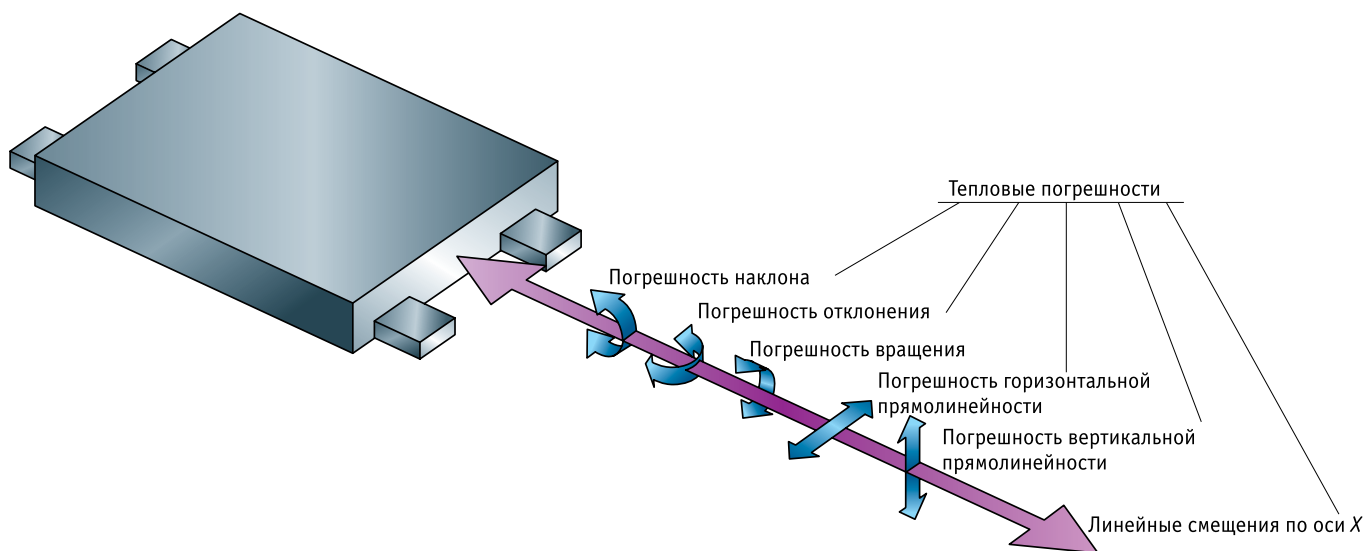


Рис. 2. Линейные и угловые погрешности станка

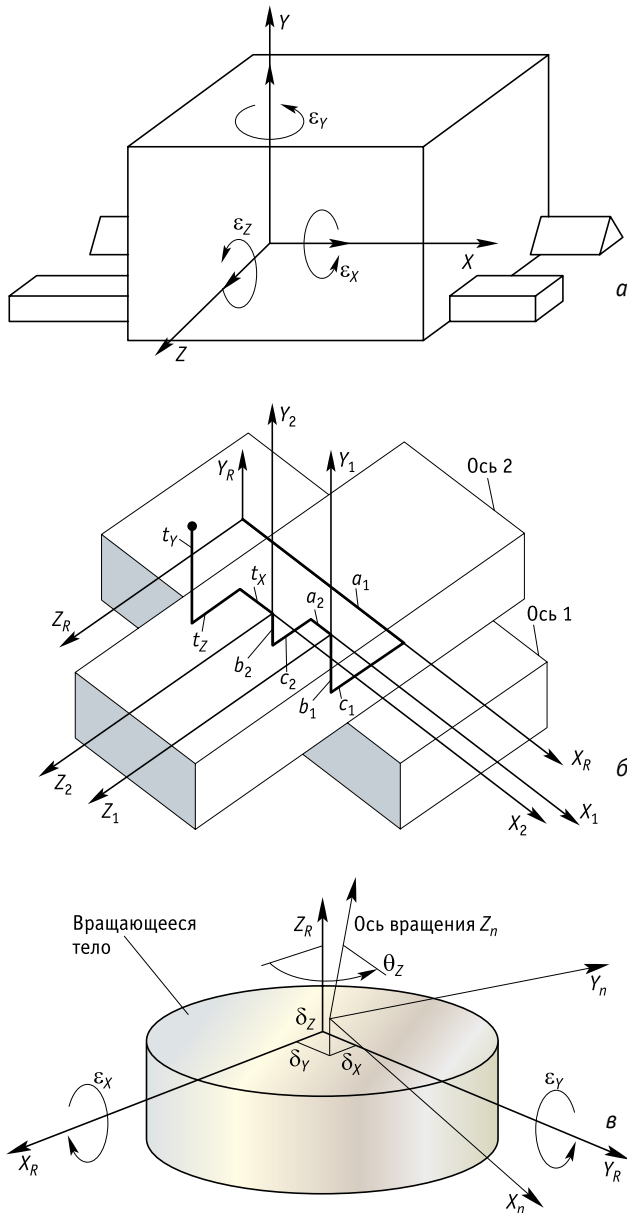


Рис. 3. Схематическое представление степеней свободы и погрешностей рабочих органов станков: *a* – в общем виде, *б* – при взаимном прямолинейном перемещении двух рабочих органов, *в* – для вращающихся деталей

Для вращающихся деталей станка схема и составляющие погрешностей показаны на рис. 3в.

Данное схематическое представление погрешностей широко применяется многими авторами и является основой для проведения самых разнообразных видов исследований по проблемам точности металлорежущих станков.

Проблемой, требующей особого изучения, является расчет и корректировка нелинейных изменений длин. В частности, на рис. 4а схематично изображено воздействие постоянного темпера-

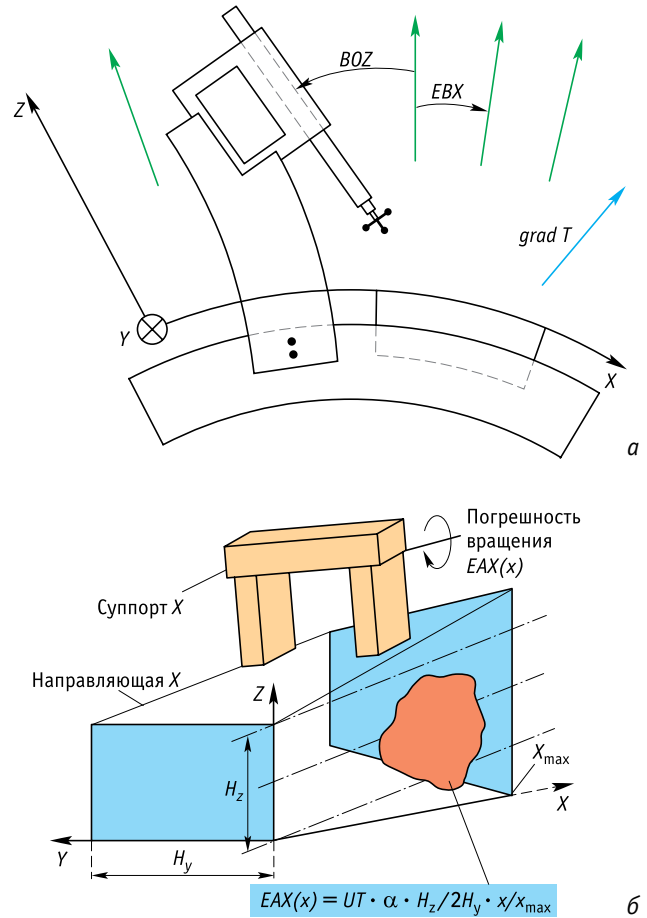


Рис. 4. Продемонстрированы: *a* – воздействие температурного градиента на характеристики точности [6], *б* – погрешности, вызываемые неоднородным температурным распределением в направляющих станка [5]

турного градиента на характеристики точности станка. Температурный градиент вызывает изгиб станины (колонны) станка, что, в свою очередь, приводит к угловым погрешностям – прямолинейности, перпендикулярности направляющих.

На рис. 4б показаны геометрические отклонения станка, вызываемые воздействием местных источников нагрева.

Шпиндели многих новых моделей обрабатывающих центров имеют скорость вращения, достигающую 20000 об/мин и более. Скорость подачи составляет 40 м/мин при использовании роликовых направляющих и до 36 м/мин при использовании направляющих скольжения.

Поэтому, учитывая погрешности в соответствии с рис. 4, особый интерес представляет проблема компенсации угловых тепловых деформаций в станке.

Модель формирования тепловых деформаций станков вертикальной компоновки состоит в монотонном линейном и угловом отклонении оси шпин-

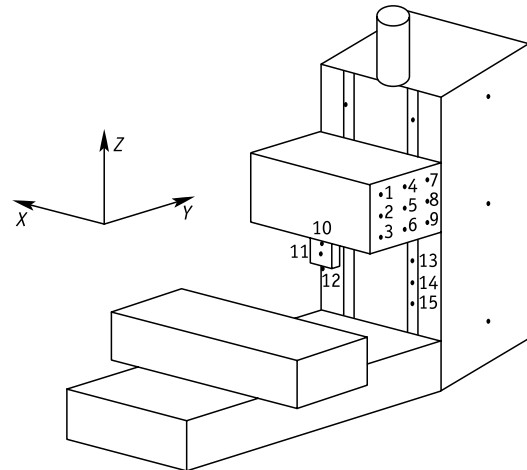


Рис. 5. Общий вид исследуемого станка (схема расположения характерных точек станка)

для станка относительно его первоначального положения. Изменение положения оси шпинделя будет происходить в связи с изменяющимся температурным полем колонны и шпиндельной бабки [2, 4, 7, 8, 9]. Процесс формирования тепловых смещений оси шпинделя происходит и обусловлен соотношением температур передней T_1^0 и задней T_2^0 стенок колонны и шпиндельной бабки. При этом возможны два варианта:

- а) температура передней стенки T_1^0 ниже задней T_2^0 ($T_1^0 < T_2^0$);
- б) температура передней стенки T_1^0 выше задней T_2^0 ($T_1^0 > T_2^0$).

Соотношение угловых и линейных деформаций колонны и шпиндельной бабки определяет как величину, так и характер изменения деформаций во времени. Следовательно, неравномерность тем-

пературного поля и его изменение являются важной составляющей оценки формирования и изменения как линейных, так и угловых погрешностей станка, обусловленных его нагревом.

Экспериментальные исследования неравномерности температур деталей и узлов проведены на вертикальном обрабатывающем центре модели TAJMAC-ZPS MCFV 1060 STANDARD. Температуры в характерных точках станка и производственного помещения измерялись бесконтактным способом. Общий вид исследуемого станка и схема расположения характерных точек приведены на рис. 5.

На рис. 6а показан диапазон изменения (в том числе случайных измерений при многократных испытаниях) средней температуры шпиндельной бабки (точки 1–9) во времени с параметрами его

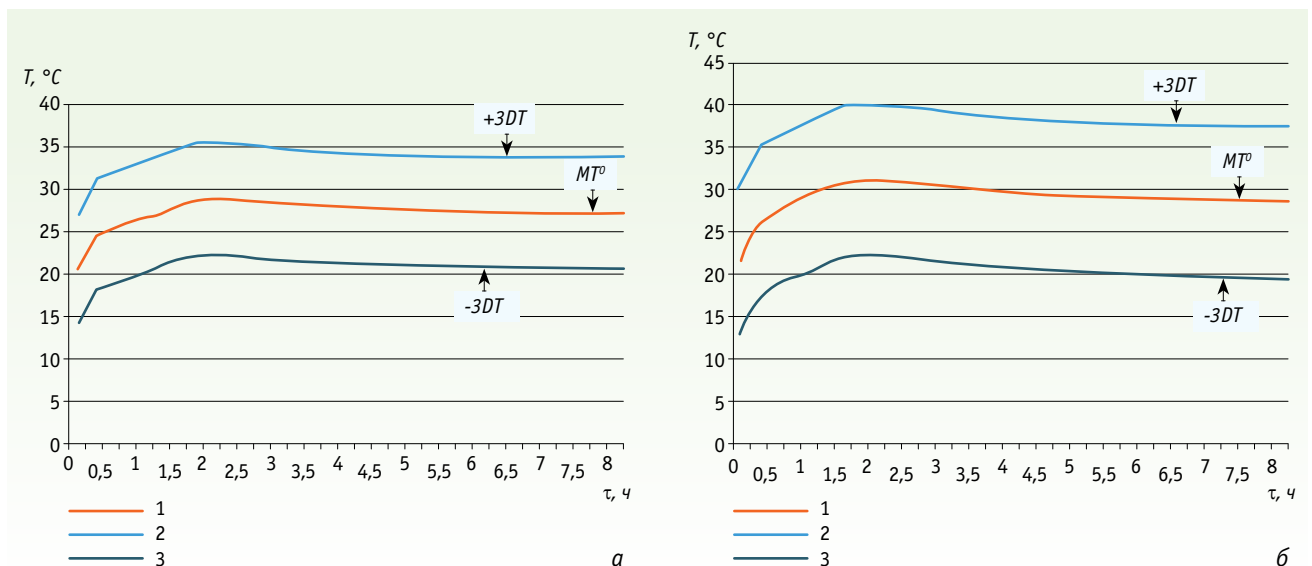


Рис. 6. Диапазон изменения: а – средней температуры шпиндельной бабки; б – средней температуры шпинделя

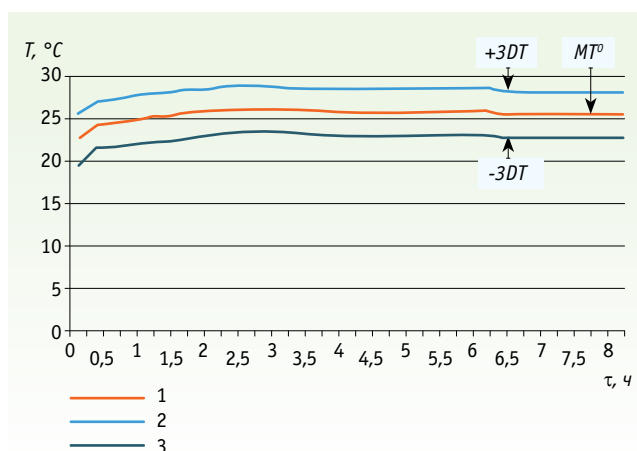


Рис. 7. Диапазон изменения температуры колонны

математического ожидания MT^0 и среднеквадратического отклонения DT . На рис. 6б представлены изменения средней температуры шпинделя (точки 10–12) во времени с параметрами его математического ожидания MT^0 и среднеквадратического отклонения DT .

На рис. 7 приведены изменения температуры колонны (точки 13–15) во времени (в том числе случайных измерений при многократных испытаниях) с параметрами его математического ожидания MT^0 и среднеквадратического отклонения DT .

В данном случае тепловой режим станка – это результат случайной реализации (для конкретной конструктивно-компоновочной структуры станка) физико-механических, теплофизических, эксплуатационных и других свойств теплонапряженных узлов, элементов и деталей станка. Величины тем-

ператур и обусловленные ими температурные смещения взаимного относительного положения узлов станка в значительной степени определяются и зависят от качества изготовления и сборки тепловыделяющих элементов станка, условий его работы, теплообмена и физико-механических свойств материалов [10].

Особый интерес представляют средние разности температур в точках 1-4-7 (верхняя плоскость шпиндельной бабки) (см. рис. 8а) и в точках 3-6-9 (нижняя плоскость шпиндельной бабки) (см. рис. 8б). В точках 1-4-7 (верхняя плоскость) разброс температур составил 4,2 °С. В точках 3-6-9 (нижняя плоскость) разброс температур составил 3,1 °С. Разность средних температур по плоскостям составляет в среднем 1,2 °С. Именно это явление определяет возникновение угловых деформаций и обуславливает линейные смещения.

Из результатов экспериментов следует, что диапазон изменения средних температур колонны (точки 13–15) при частоте вращения шпинделя 800 об/мин (рис. 9а) отличается от диапазона изменения средних температур колонны (точки 13–15) при частоте вращения шпинделя 8000 об/мин (рис. 9б). На частоте 800 об/мин разброс температур составил 3,6 °С. На частоте 8000 об/мин разброс температур составил 3,5 °С. Разность температур при различных частотах вращения шпинделя составляет в среднем 0,6 °С.

Разность средних температур шпинделя (точки 10–12) при частоте вращения шпинделя 800 об/мин (рис. 10а) и средних температур шпинделя (точки 10–12) при частоте вращения шпинделя 8000 об/мин

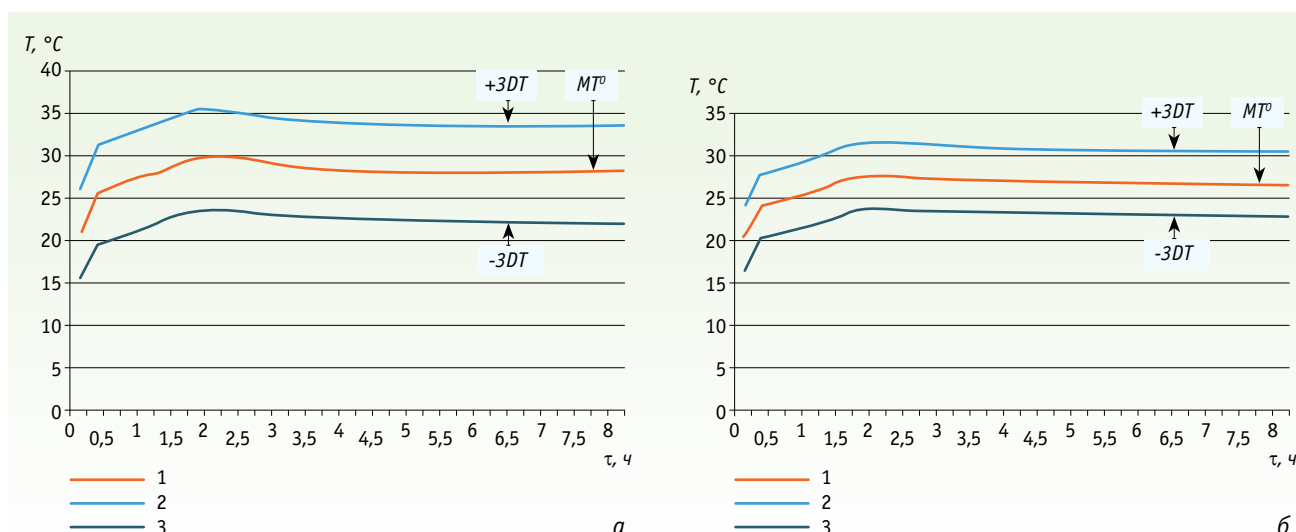


Рис. 8. Диапазон изменения: а – температура верхней плоскости шпиндельной бабки (точки 1-4-7); б – температура нижней плоскости шпиндельной бабки (точки 3-6-9)

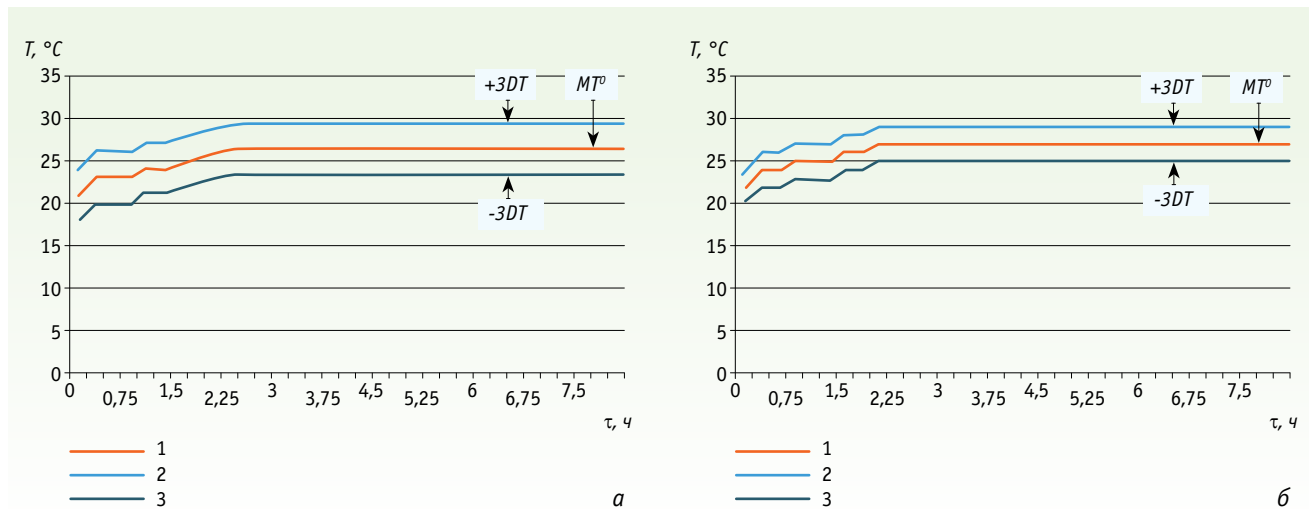


Рис. 9. Диапазон изменения: а – температура колонны при частоте вращения шпинделя 800 об/мин; б – при частоте вращения шпинделя 8000 об/мин

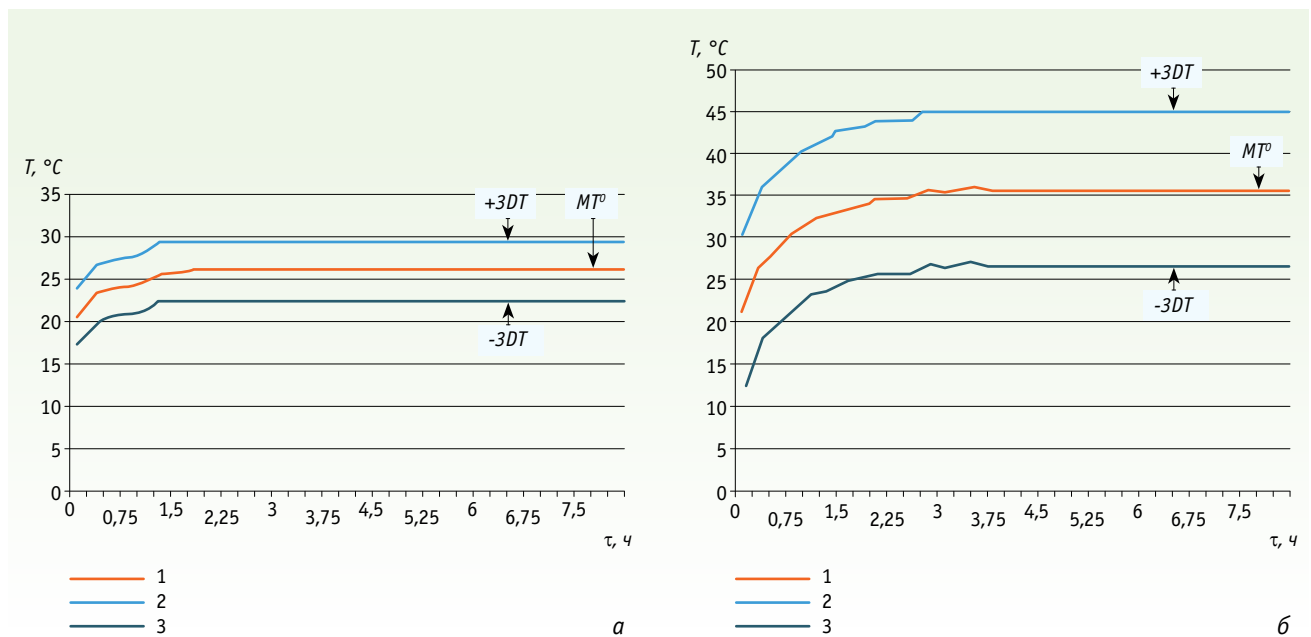


Рис. 10. Диапазон изменения температуры шпинделя: а – при частоте вращения шпинделя 800 об/мин; б – при частоте вращения шпинделя 8000 об/мин

(рис. 10б). На частоте 800 об/мин разброс температур составил 3,148°C. На частоте 8000 об/мин разброс температур составил 12,2°C. Разность температур при различных частотах вращения шпинделя составляет в среднем 8,6°C.

Таким образом, возникновение температурных градиентов в колонне и шпинделе станка приводит к возникновению теплового изгиба и погрешностей, обусловленных им.

По экспериментальным данным определяют (по известным в научной литературе соотношениям) тепловые смещения деталей и узлов станка. Так, нами получены:

- для колонны тепловое расширение по оси y – 7,8 мкм; тепловой изгиб по оси y – 8,5 мкм; тепловое расширение по оси z – 56 мкм;
- для шпиндельной бабки тепловое расширение по оси y – 29 мкм; тепловой изгиб по оси z – 8 мкм; тепловое расширение по оси z – 14,5 мкм;
- для шпинделя тепловое удлинение по оси z – 26,5 мкм.

ВЫВОД

Таким образом, экспериментально установлено, что тепловой изгиб (тепловые угловые дефор-

мации) составляют значительную долю (от 15 до 20%) от полных тепловых деформаций оси шпинделя станка. Это обуславливает необходимость и важность изучения проблемы оценки не только линейных, но и угловых тепловых деформаций для металлорежущих станков, а также их взаимосвязь с параметрами точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кузнецов А.П.** Методы оценки тепловых деформаций металлорежущих станков и пути их снижения. М.: НИИМаш, 1983. С. 2.
2. **Стародубов В.С., Кузнецов А.П.** Тепловые деформации базовых деталей металлорежущих станков. М.: Известия вузов. «Машиностроение». 1978. № 12. С. 143–148.
3. **Кузнецов А.П.** Тепловое поведение и точность металлорежущих станков. М.: Янус-К., 2011. 256 с.
4. **Кузнецов А.П., Иванов М.Г.** Методы воздействия на теплостойкость металлорежущих станков. М.: ВНИИТЭМР, 1986. 60 с.
5. **Slocum A.H.** Precision machine design. — Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1992. NJ.
6. Teeuwsen JWMC, et al, (1989) A General Method for Error Description of CMMs Using Polynomial Fitting Procedures. Annals of the CIRP 38(1): 505–510.
7. **Кузнецов А.П., Чурабо С.В.** Анализ влияния тепловых деформаций базовых узлов и деталей станка и их относительных положений на тепловые смещения оси шпинделя / VIII Международная научно-техническая конференция «Проблемы исследования и проектирования машин (МК-123-912)». Пензенский государственный университет. 2012. Ноябрь.
8. **Кузнецов А.П., Косов М.Г.** Структурный теплофизический анализ металлорежущих станков // СТИН. 2011. № 3. С. 13–21.
9. **Tae Jo Ko, Tae-weon Gim, Jae-yong Ha.** Particular behavior of spindle thermal deformation by thermal bending // International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003). 17–23.
10. **Кузнецов А.П.** Тепловой режим металлорежущих станков. М.: Янус-К, 2013. 61 с.

ЧУРАБО Станислав Валерьевич –
 аспирант кафедры «Станки» МГТУ «СТАНКИН»