

Твердость полученных композиционных покрытий (ZrCN) точно определить не удалось из-за растрескивания покрытия, что говорит о высокой его твердости. Очевидно это связано с высокой дисперсностью фазы ZrN.

Микроструктура покрытий получена на атомном силовом микроскопе (рис. 6).

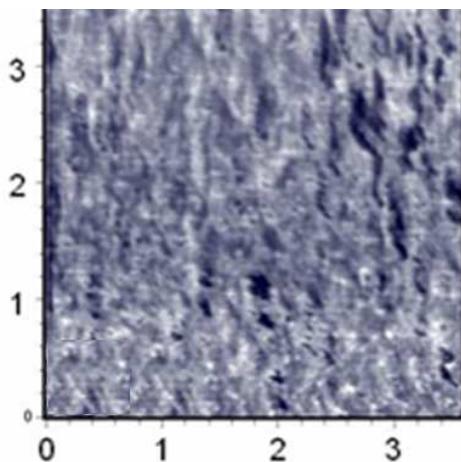


Рис. 6. Микроструктура покрытия ZrCN

На поверхности покрытия не наблюдается столбчатых ростовых структур, характерных для TiN. Прослеживается однородная структура покрытия без заметных включений и зерен. Среднеквадратичная шероховатость на базовой длине 25 мкм составила 12,5 нм.

Трибологические испытания показали, что коэффициент трения покрытия ZrCN $k \approx 0,4$.

Упрочненные пуансоны с толщиной покрытия 2,5–3 мкм были испытаны на прессовом оборудовании (63-тонный штамповочный пресс K2128E).

Предварительные испытания показали увеличение эксплуатационных свойств пуансонов в 2–3 раза (6000–9000 отверстий). При этом не были установлены случаи выхода из строя пуансонов путем поломки, эксплуатация пуансонов прекращалась в результате абразивного износа покрытия и притупления режущей кромки.

Заключение. В результате проведенных исследований по повышению эксплуатационных свойств штамповой оснастки с помощью вакуумно-плазменной установки получены градиентные композиционные покрытия на основе карбонитридов циркония обладающие высокими твердостью и адгезией, низким коэффициентом трения.

Разработаны основы технологии нанесения покрытий на штамповую оснастку.

Проведенные предварительные испытания упрочненных пуансонов показали, что их эксплуатационные свойства увеличились в 2–3 раза.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gregor A., Podgursky V., Adoberg E., Kulu, P. Hard coatings manufacturing technology used in tooling // Proceedings of 5th International DAAAM Baltic Conference "Industrial engineering – adding innovation capacity of labour force and entrepreneurs" 20–22 April 2006, Tallinn, Estonia – P. 255–260.
2. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon // Mat. Sci. En. – 2002. – Vol. 37. – P. 129–281.
3. Коваленко, В.И. Прочность поверхностных слоев циркониевых сплавов и вакуумно-дуговых покрытий при микроударном воздействии / В.И. Коваленко, В.Г. Маринин // Вопросы атомной науки и техники – 2008. – № 1. – С. 77–80.
4. Лахтин, Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов.* Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1977. – 409 с.

Материал поступил в редакцию 06.10.10

ONYSKO S.R., SAZONOV M.I., HVISEVICH V.M., CHEKAN N.M., AKULA I.P. Increase of operational properties to cut down punchon by drawing a thin film carbide zirconium

Research results of physical, mechanical and tribological properties gradient coatings on base nitride and carbide zirconium obtained by cathodic arc method are presented. It is showed that the coating revealed composite structure of ZrC phase embedded in ZrN matrix. The dry friction coefficient of the gradient composite coating is closed to dry friction coefficient of ZrCN of 0,4. The usage of ZrCN coatings on the punches made of chromium steel increases their life span by a factor of 2–3.

УДК 621.9 06-192:620.1

Горбунов В.П., Омесь Д.В.

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СТОЙКИ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Введение. Многоцелевой станок (МЦС) с числовым программным управлением (ЧПУ) представляет собой сложное, дорогостоящее оборудование. Эффективность использования МЦС связана с обеспечением требуемой точности, производительности и экономичности, которые в значительной степени определяются уровнем надежности, параметрами восстановления и ремонта. Для металлорежущих станков потеря работоспособного состояния в первую очередь связана с выходом основных технических параметров за допустимые пределы. Эта проблема особенно актуальна для прецизионных станков [1].

Существенное влияние на точность обработки оказывают тепловые деформации базовых элементов несущей системы МЦС, которые приводят к изменению относительного положения базовых поверхностей, несущих заготовку и инструмент. МЦС является сложной системой, распределение теплоты в которой проблематично

но описать аналитически. Тепловая энергия от внешних и внутренних источников передается деталям станка, перераспределяется между ними и частично отводится в окружающую среду. При этом протекают такие элементарные процессы, как теплопроводность, конвекция и тепловое излучение. Однако ни один из этих элементарных процессов в изолированном виде на практике не существует.

Тепловые деформации узлов и деталей станка носят сложный пространственно-временной характер и зависят от многих факторов: конструкции и компоновки узлов станка, режимов работы станка, последовательности и длительности работы на том или ином режиме, теплофизических параметров материалов, из которых изготовлен станок, условий теплообмена, геометрической формы узлов станка и многих других параметров.

Базовые узлы, из которых komponуются станки, имеют значительные размеры по сравнению с источниками тепловыделений,

Горбунов Виктор Петрович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой машиноведения Брестского государственного технического университета.

Омесь Дмитрий Владимирович, ассистент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, 224023, г. Брест, ул. Московская, 267.

поэтому они будут существенно влиять на формирование теплового режима станка и приводить к заметным тепловым смещениям. В значительной степени тепловому воздействию подвержены станины и стойки, так как они несут в себе приводы движений и шпиндельные узлы, имеют значительную площадь теплопроводящей поверхности. Поэтому важным этапом при анализе точности станка является определение тепловых деформаций базовых элементов.

Тепловые расчеты узлов и деталей станка основываются на фундаментальных работах по теории теплопроводности твердых тел. Расчеты тепловых деформаций базируются на теории термоупругости. Сложность конструкции базовых деталей станков, разнообразие условий теплообмена, особенности условий эксплуатации, многообразие форм и конфигураций, наличие рассредоточенных источников тепла обуславливают во многих случаях невозможность применения имеющихся решений.

Постановка задачи. В период работы МЦС с ЧПУ происходит отклонение оси шпинделя, вызванное тепловыми деформациями элементов станка. Это отклонение приводит к увеличению погрешности обработки, и в случае малого резерва станка по точности получаемый при обработке поверхности размер может выйти за пределы поля допуска, что является параметрическим отказом. Отклонение положения шпинделя вследствие температурных деформаций станка является величиной переменной и зависит в первую очередь от частоты вращения, времени работы и условий эксплуатации станка.

При анализе баланса точности обработки было выявлено, что доля погрешностей от температурных деформаций базовых деталей станка может достигать 65% [2]. В качестве основных элементов при тепловом анализе и расчете МЦС выбираются те его детали, которые имеют относительно большие линейные размеры, площадь теплоотдающей поверхности, массу (станины, стойки, шпиндельные бабки, ползуны и др.).

При длительной эксплуатации станка возникает необходимость компенсации тепловых деформаций для снижения их влияния на точность обрабатываемой поверхности. Существуют различные методы компенсации и минимизации термоупругих смещений элементов МЦС, в том числе с помощью функции коррекции в управляющей программе ЧПУ. Для принятия поправок необходимо знать величину тепловых смещений для каждого момента времени, так как она является функцией температуры $\Delta = f(\theta)$, которая в свою очередь есть пространственно-временная функция $\theta = f(x, y, z, t)$ представляющая собой температурное поле [3].

Частным случаем является термосимметричное тепловое поле, когда изменение температуры симметрично относительно некоторой плоскости, и тепловое смещение точек происходит в пределах этой плоскости. Станок МС12-250 имеет вертикальную колонну, смонтированную на плите, консольный стол, шпиндельный узел, расположенный внутри колонны. Компонентная схема станка является термосимметричной относительно плоскости YOZ и смещения шпинделя вдоль оси X отсутствуют либо пренебрежимо малы [4].

Чтобы выделить зависимость выходного параметра точности от температуры несущих элементов и с достаточной степенью точности прогнозировать величину теплового смещения оси шпинделя, необходимо проводить эксперимент.

Недостаток экспериментального исследования в необходимости воспроизводить продолжительный процесс функционирования оборудования, так как тепловые процессы, протекающие в нем, носят нестационарный характер и до наступления теплового равновесия проходит порядка 4...6 часов. Результаты такого эксперимента применимы для прогнозирования технологического состояния лишь исследуемого станка, и при смене объекта диагностирования эксперимент следует повторять, что весьма трудоемко.

При выборе метода решения термоупругой задачи следует учитывать степень сложности решения; гибкость метода, т.е. возможность быстрого перехода от одного объекта к другому; трудоемкость подготовительных работ и решения; сложность и стоимость устройств, необходимых для реализации данного метода.

На практике при определении температурного поля и расчете тепловых деформаций рационально применять Метод Конечных Элементов (МКЭ). Основное его достоинство – применимость для тел неправильной формы и сложных условий на границе тела.

Применение моделирования теплофизических процессов, происходящих в технологическом оборудовании, с помощью ЭВМ и специализированных программных средств может значительно сократить трудоемкость решения аналогичных задач при смене объекта исследования, так как единожды созданная тепловая модель может быть адаптирована к новому объекту в кратчайшие сроки. Стоит обратить внимание на адекватность построенной модели – соизмеримость результатов, полученных экспериментально и при моделировании.

Методика исследования. Настоящее исследование направлено на применение моделирования при определении тепловых деформаций несущих элементов технологических систем, переход от длительных экспериментов к исследованию термоупругой модели. Процесс моделирования достаточно трудоемок, но значительно менее энергозатратен и экономически выгоден, так как не требует дорогостоящей измерительной аппаратуры.

Для проведения исследования можно предложить следующий порядок:

1. На основании доступной технической документации и чертежей производится анализ компоновки и конструкции станка, элементов несущей системы, характер их сочленения. Важно выявить те базовые детали, которые имеют наибольшие геометрические размеры, протяженные теплопроводящие поверхности. Такие поверхности даже при незначительных избыточных температурах будут иметь деформации значительно снижающие геометрическую точность станка. Наибольшие геометрические размеры в станке МС12-250 имеет вертикальная стойка коробчатой формы, несущая в себе шпиндельный узел.

2. По доступным чертежам и натуральным размерам создается трехмерная твердотельная полноразмерная модель стойки в графической среде SolidWorks. При построении модели учитывается большинство конструктивных элементов таких, как отверстия в стенках, внутренние ребра жесткости, бобышки и выступы для крепления узлов станка. Важно учесть те конструктивные особенности конструкции, которые могут снижать или повышать жесткость стойки. При моделировании нет необходимости выполнять относительно малые конструктивные элементы, такие как отверстия под крепежные элементы, скругления кромок литой конструкции стойки, так как они не оказывают сколь-нибудь значимого влияния на последующие результаты термоупругого расчета.

3. Производится анализ теплового режима. Для более точного моделирования тепловых процессов, происходящих в станке, необходимо учитывать большое количество факторов, влияющих на тепловой режим при эксплуатации станка: количество, мощность и расположение внутренних и внешних источников тепловыделения; возможные направления протекания элементарных процессов (теплопроводность, конвекция, тепловое излучение); температура окружающей среды; интенсивность тепловых процессов при различных режимах работы оборудования; наличие конструктивных и технологических стоков теплоты (система охлаждения, вентиляционные отверстия и др.). Производится измерение температуры отдельных наружных и внутренних поверхностей стойки в период эксплуатации.

4. Осуществляется моделирование термоупругих процессов стойки в среде конечно-элементного модуля CosmosWorks. Создается сетка дискретизации – модель стойки разбивается на большое количество конечных элементов. От степени дискретизации зависит точность расчетов. К твердотельной модели прикладываются граничные условия: теплофизические свойства материала стойки; температуры поверхностей, рядом с которыми расположены источники тепловыделения; конвективный теплообмен с окружающей средой; временной интервал до наступления теплового равновесия. Тепловой расчет позволяет определить распределение температуры по наружным и внутренним поверхностям рассматриваемого базового элемента. На этом этапе также можно проверить утверждение о термосимметричности стойки.

5. Приемлемость моделирования или адекватность тепловой модели необходимо одновременно проверить экспериментально. Измерение смещения шпинделя в результате тепловых деформаций будет производиться по методике, предложенной в [4]. Сравнению будут подвергаться величины смещений точки стойки, расположен-

ной у передней опоры шпинделя. При моделировании тепловых процессов в стойке, возможно определить лишь деформации самой стойки. В то время как экспериментально измеренные смещения шпинделя являются суммарными смещениями в результате тепловых деформаций шпинделя и стойки. Поэтому следует это учитывать при сопоставлении результатов.

6. Предусматривается корректировка параметров модели для достижения сходимости с экспериментальными результатами. При изменении режима работы МЦС можно скорректировать граничные условия и повторно произвести процесс расчета для уже существующей модели. Обладая тепловой моделью станка, конструктор может вносить изменения в конструкцию колонны и наблюдать результат изменения тепловых полей и деформаций.

Результаты исследования и обсуждение. По имеющейся технической документации и непосредственному обмеру стойки станка МС12-250 была создана полноразмерная трехмерная модель стойки в графической среде с присвоением теплофизических свойств материала (чугун СЧ20). Модель содержит все конструктивные элементы, которые могут значительно повлиять на тепловую упругость: внутренняя полость, отверстия для транспортировки, ниши для размещения исполнительных механизмов и узлов станка, направляющие. При расчете был учтен конвективный теплообмен с окружающей средой. Далее были смоделированы тепловые процессы, происходящие в материале стойки, и вызываемые ими тепловые деформации.

Для подтверждения адекватности модели проводились экспериментальные исследования на холостом режиме работы станка (без процесса резания) при частотах вращения шпинделя 500...2000 мин⁻¹ по предложенной теоретической модели (рис. 1). При этом было также подтверждено предположение о термосимметричности конструкции станка относительно сечения в плоскости YOZ. Так же было установлено, что неравномерный нагрев передней и задней стенок стойки приводит к угловому смещению оси шпинделя и, вследствие этого, к линейному смещению области существования рассматриваемого выходного параметра (в нашем случае погрешности позиционирования) вдоль направления оси Y.

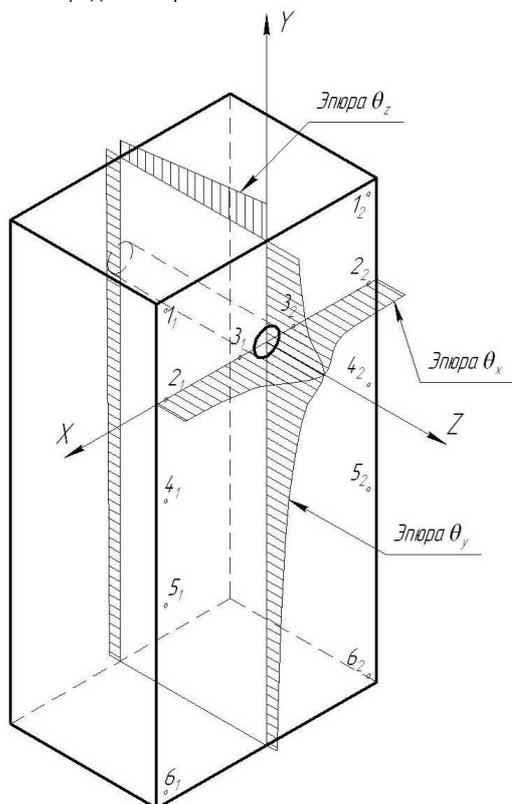


Рис. 1. Теоретическая модель экспериментального исследования: 1₁, 1₂...6₂ – точки измерения температур; $\theta_z, \theta_y, \theta_x$ – распределение температур по поверхностям стойки в направлении осей X, Y, Z соответственно

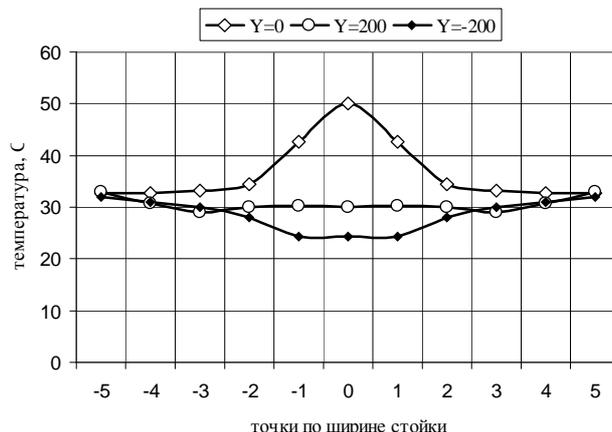


Рис. 2. График распределения температур по ширине модели стойки

На рис. 3 изображено полученное при моделировании распределение температур по объему стойки в установившемся тепловом режиме. Можно визуально оценить расположение наиболее и наименее нагретых областей и направления тепловых потоков. Предположительно, размещение бака гидросистемы могло нарушить термосимметричность конструкции стойки. Однако расположенный справа шкаф электроаппаратуры оказывает тепловое воздействие, которое «выравнивает» симметричность теплового поля стойки. График распределения температур по передней стенке (рис. 2) вдоль оси X на различной высоте (Y=-200, Y=0 и Y=200) подтверждает предположение о термосимметричности конструкции стойки. График изменения температуры передней и задней стенки (рис.4) вдоль оси Y указывает на более высокие избыточные температуры передней стенки, которые приводят к большему тепловому расширению и отклонению стойки назад, и как следствие – линейному и угловому смещению шпинделя в плоскости YOZ.

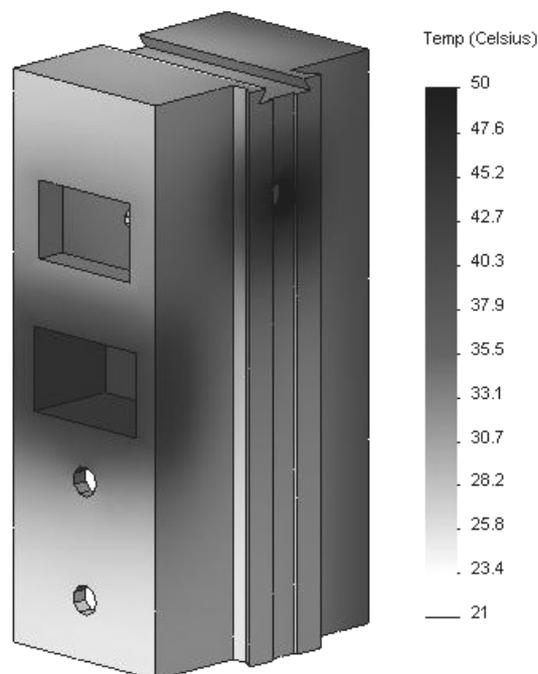


Рис. 3. Тепловое поле стойки в установившемся режиме

По тепловой модели определены тепловые деформации и смещения поверхностей и точек стойки. На рис. 5 изображен градиент смещений и «грубые» деформации стойки. Как видно, стойка «наклоняется» назад, что обусловлено менее нагретой задней стенкой.

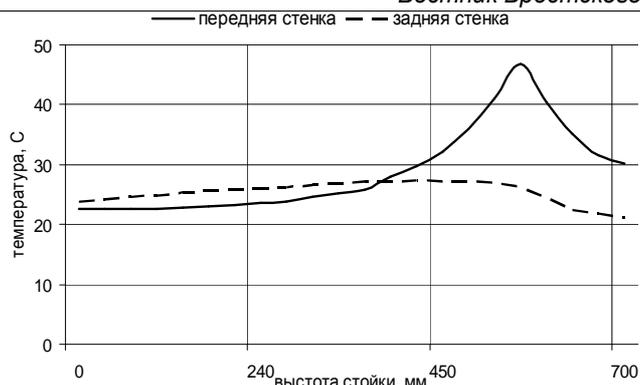


Рис. 4. График изменения температуры по высоте передней и задней стенок стойки

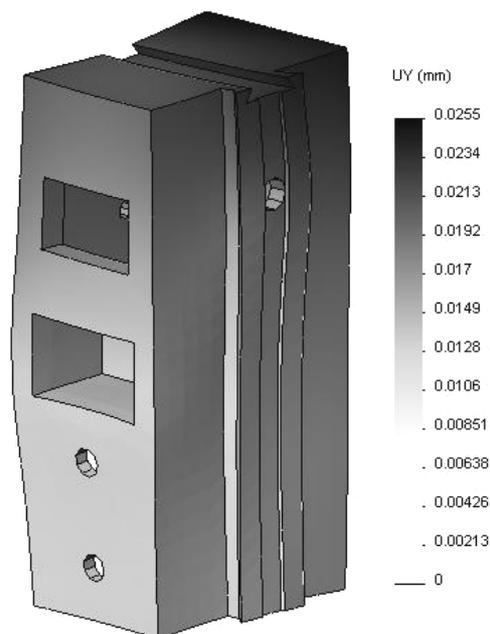


Рис. 5. Эпюра смещений по оси Y в результате тепловых деформаций в установившемся режиме

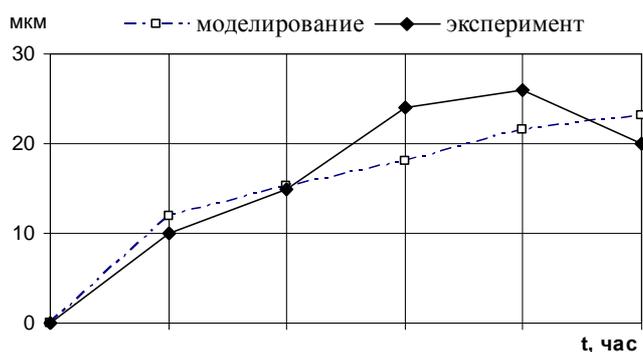


Рис. 6. Величина смещения ΔY оси шпинделя в период до наступления теплового равновесия

Значения фактического смещения оси шпинделя в рабочей зоне станка показали высокую достоверность результатов расчета. Небольшое отклонение результатов измерений смещения шпинделя (рис. 6) можно объяснить тем, что при моделировании определялось смещение отверстия в стойке, а при экспериментальном исследовании измерялось смещение установленной в шпинделе оправки. Наличие вылета приводит к увеличению измеряемого смещения шпинделя вдоль оси Y.

Заключение. Неравномерное температурное поле сильно искажает первоначальные формы и взаимное расположение поверхностей деталей станка, увеличивая тем самым погрешность обработки. Вследствие тепловой инерции наибольшая неравномерность имеет место в начальный период работы станка, а также при изменении режима обработки.

1. Угловое смещение шпинделя вызвано разностью температур передней и задней стенки стойки, а смещение вдоль оси Y зависит от высоты расположения шпинделя и толщины стенок. Тепловые деформации базовых деталей станка с ЧПУ также приводят к изменению геометрической точности (перпендикулярность, параллельность, прямолинейность), точности позиционирования. Ошибки, возникающие из-за действия теплового фактора, соизмеримы с начальной погрешностью станка. Основная доля тепла при работе выделяется в приводе главного движения и шпиндельном узле.
2. Имея в распоряжении тепловую модель стойки, можно корректировать граничные условия при изменении режимов работы МЦС и оперативно получать величины тепловых смещений шпинделя. Появляется возможность учитывать также силовые факторы (нагрузка на горизонтальный шпиндель, влияние консольного стола), которые дополнительно влияют на величину деформации стойки.
3. Создав такую вполне адекватную модель, можно с определенной степенью точности прогнозировать изменение начальной точности станка с последующей компенсацией ее устройством ЧПУ, а также определять пути увеличения данной точности при проектировании станков за счет изменения расположения источников тепловыделения, мощности тепловых потоков, конструкции элементов и др.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Надежность и диагностика технологических систем: учеб. / А.Г. Схиртладзе, М.С. Уколов, А.В. Скворцов; под ред. А.Г. Схиртладзе. – Москва: Новое знание, 2008. – 518 с.
2. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
3. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты». – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
4. Горбунов, В.П. Диагностирование тепловых деформаций многоцелевого станка с ЧПУ / В.П. Горбунов, В.Ф. Григорьев, А.Н. Рудюк // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2008. – №4(52): Машиностроение. – С. 34–37.

Материал поступил в редакцию 04.10.10

HARBUNOU V.P., OMES D.V. Thermal deformations analysis of a rack of the multi-purpose machine tool with numerical control

The technique of modelling of the thermoelastic processes occurring in a rack of the multi-purpose machine tool is offered. It is suggested to apply the Finite Elements Method (FEM) to definition of temperature fields and thermal deformations of the machine tool carrying system parts.

Thermal deformations of a rack make considerable impact on accuracy of processing on the precision machine tool. Because of non-stationary character of deformations occurrence their definition becomes complicated.

A rack thermosymmetry to plane YOZ is confirmed by modelling and experimentally that allows not to consider a spindle displacement along X-axis. Experiment has shown good convergence of temperature and displacement values with the results received by computer modelling.