

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120

Никитина И.П., Поляков А.Н.Оренбургский государственный университет
Россия, 430005, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13***E-mail: innanikitina@list.ru*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУСТОРОННЕГО ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

Аннотация. В работе предложена методология экспериментальных исследований двусторонних торцешлифовальных станков по критерию теплоустойчивости, включающая: методику имитации процесса шлифования; методику измерения температур; методику измерения изменений взаимного углового положения кругов; методику измерения погрешности обработки. Предложенные в работе методики экспериментального исследования теплового поведения и погрешности обработки двустороннего торцешлифовального станка позволяют проводить доводку станка в условиях реального производства. При этом предварительно проведенные натурные испытания двустороннего торцешлифовального станка показали, что при шлифовании промышленной партии цилиндрических роликов избыточные температуры распределились неравномерно по узлам станка как на холостом ходу, так и при шлифовании. Наибольшую избыточную температуру при работе на холостом ходу имели торцы шпиндельных бабок и станины, а при шлифовании – поверхности узлов станка, находящиеся в непосредственной близости от зоны шлифования. Характер изменения избыточных температур характерных точек и смазочно-охлаждающей жидкости при имитации процесса шлифования на станке полностью совпал с экспериментальными данными, полученными на работающем станке.

Ключевые слова. торцешлифовальные станки, температурные деформации, теплоустойчивость, повышение точности, методики.

Введение. По разным оценкам геометрическая погрешность обработанных на станке деталей, обусловленная тепловыми деформациями элементов его несущей системы, составляет не менее 50 % от общих погрешностей обработки [1–5]. В настоящее время существуют две альтернативные точки зрения на эффективность обеспечения теплоустойчивости станков [6]. В соответствии с первой точкой зрения осуществляется детальная проработка конструкторских решений, основанная на максимально подробных математических моделях, учитывающих множество факторов и использующих сложные математические модели [7–11]. Согласно другой точке зрения, теплоустойчивость станков эффективно обеспечивается на основе реализации технологий компенсации тепловой погрешности станков [12–17].

Для узлов станков торцешлифовальной группы, находящихся на стадии проектирования, наиболее важным является определение температурных деформаций, которое позволит оценить качество конструкций по критерию точности обработки, дать рекомендации по улучшению температурных характеристик, выбрать наиболее рациональную конструкцию, удовлетворяющую

предъявленным требованиям к точности обработки.

В настоящее время торцешлифовальные станки используются в основном в подшипниковой промышленности.

Показатели работоспособности подшипников во многом определяются точностью изготовления тел качения, в том числе и цилиндрических роликов, торцы которых обрабатываются на двусторонних торцешлифовальных станках.

Требования по точности обработки торцов цилиндрических роликов задаются следующими показателями: точностью размера по длине (разноразмерностью), допускаемой погрешностью геометрической формы (выпуклостью торца) и торцовым биением. Улучшение первого показателя связано, главным образом, с совершенствованием системы автоматической подналадки шлифовальных кругов на заданный размер при шлифовании партии деталей. Среди двух других – основным показателем точности, исходя из функционального назначения торцовых поверхностей (торец служит технологической базой при обработке цилиндрической поверхности на бесцентровошлифовальном станке), явля-

ется торцовое биение, которое лимитирует величину отклонения от перпендикулярности торцов и поверхности качения. В связи с этим, в качестве основной характеристики точности принято торцовое биение цилиндрических роликов. Допуски на торцовое биение цилиндрических роликов постоянно ужесточаются. Так для цилиндрического ролика диаметром 18 мм предусматриваются первая и вторая степени точности обработки по ГОСТ 22696–2013.

Обработка деталей на торцешлифовальных станках связана с выделением значительного количества теплоты, оказывающей заметное влияние на точность обработки [18]. Так как в результате тепловых деформаций взаимное положение рабочих торцов двух абразивных кругов изменяется в пространстве, то можно, приведя их перемещения к трем осям координат, рассмотреть

возникающую погрешность обработки в каждом из трех направлений. Линейные перемещения (по оси Y , рис. 1) компенсируются износом шлифовальных кругов и величиной их подналадки в процессе шлифования. Отклонения кругов в плоскости XOY (вдоль направления перемещения заготовок) практически не оказывают влияния на качество обработки. И третье направление тепловых перемещений кругов – в плоскости YOZ , проходящей через оси шпинделей перпендикулярно станине станка. Эти перемещения, оказывающие существенное влияние на качество обработки, так как величина их перемещений соизмерима с величиной непараллельности торцов кругов, также являются критерием оценки качества конструкции станка.

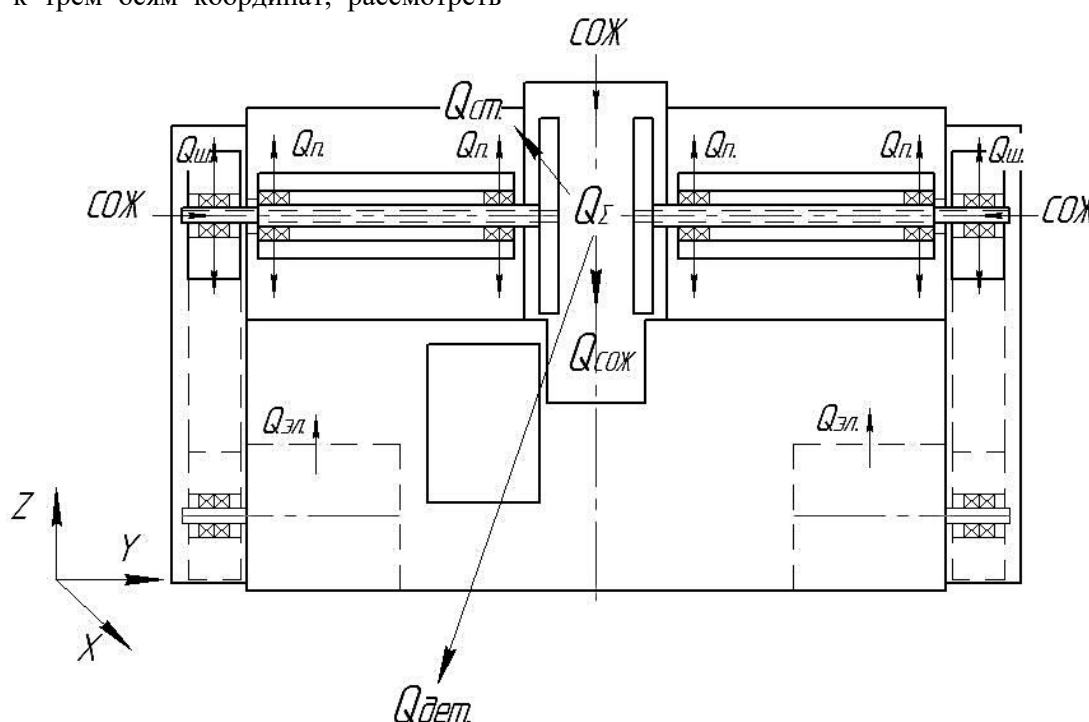


Рис. 1. Схема распределения тепловых потоков в двустороннем торцешлифовальном станке

Типовым представителем гаммы двусторонних торцешлифовальных станков с горизонтальным расположением шпинделей является станок модели 3А343АДФ2. Данный станок предназначен для шлифования роликов подшипников, у которых обработка идет с повышенными мощностями шлифования и, как следствие, увеличением погрешности обработки во время работы станка. У этого станка все основные узлы унифицированы с остальными представителями данной гаммы станков. Это позволило с несущественными уточнениями использовать результаты исследований применительно к станкам данной гаммы.

При разработке методики экспериментальных исследований необходимо было решить следующие технические задачи:

- оценить изменение температуры в характерных точках станка и изменение температуры смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в процессе работы станка;
- измерить взаимное угловое положение кругов во время работы станка.

Для решения этих задач необходимо разработать:

- методику имитации процесса шлифования;
- методику измерения температуры;

- методику определения взаимного углового положения кругов, обусловленного тепловыми деформациями;

- методику измерения погрешности обработки.

Методика имитации процесса шлифования. Во время работы станка измерение температурных деформаций затруднено, поэтому необходимо реализовать методику имитации процесса шлифования на неработающем станке должна приводить к аналогичным тепловыделениям для работающего станка под нагрузкой. В этом случае полученные температурные поля и взаимное угловое положение кругов будут близки к тем, которые имеют место при работе станка под нагрузкой.

Температурный режим работы станка достаточно сложен и находится в широком тепловом и временном диапазонах. Если начало работы характеризуется, в основном, нагревом от работы электродвигателя на холостом ходу, приводного шкива и теплом выделяемым подшипниками, то во время шлифования основная тепловая нагрузка перемещается к центру станка, в зону резания, соответственно тепловые деформации системы изменяют не только свою величину, но, в ряде случаев, и направление.

В связи с этим изменение тепловых перемещений кругов производилось в двух предельных тепловых состояниях станка.

Имитация начала работы осуществлялась при работе станка на холостом ходу с подачей СОЖ от индивидуального бака со следующими характеристиками:

- объем бака – 1,2 м³;
- площадь теплоотдающей поверхности – 10 м²;
- коэффициент теплоотдачи бака – 0,93 кВт/м²градус;
- СОЖ располагается на трех уровнях друг над другом;
- СОЖ в зону шлифования подается с помощью насоса центробежного типа П-180;
- производительность насоса – 90 л/мин;
- очистка осуществляется магнитным сепаратором с пропускной способностью – 0,2 м³/мин.

В качестве СОЖ использовался 3% водный раствор эмульсола НГЛ-205.

Для имитации процесса шлифования была разработана система подогрева СОЖ, проходящей через станок как это происходит во время шлифования. Для этой цели в индивидуальном баке охлаждения с помощью термоэлектрических нагревателей (ТЭН) имитировали различ-

ную мощность шлифования, что, с учетом остывания СОЖ в трубопроводах, соответствовало рабочей мощности. Так, нагрев СОЖ нагревателями мощностью 18 кВт соответствовал рабочей мощности в 12 кВт. Подогрев СОЖ в баке проводился с помощью нагревателей мощностью 18 и 6 кВт. Такие значения мощности характерны для средних условий шлифования роликов диаметрами 18 и 12 мм.

Методика измерения температур. Измерение температур проводилось с помощью двух электродных термопар со спаем. В качестве электродов термопар была выбрана пара медь–константан. При выборе пары руководствовались величиной термоЭДС (электродвижущая сила) термопары в рабочем диапазоне температур и крутизной характеристики, обеспечивающей ее достаточную чувствительность. В качестве регистрирующей аппаратуры использовался гальванометр.

Чтобы уменьшить погрешность измерения, градуировка каждой из термопар проводилась вместе с прибором. Спай каждой термопары помещался в термостат с холодной водой. По мере нагрева, через каждые 5 °С, записывалась температура, измеряемая с помощью ртутного термометра, пределы измерения которого 0–100 °С. Параллельно записывались показания гальванометра.

Измерение температур проводилось в отдельных точках станка, для чего спай каждой термопары помещался в высверленное отверстие (глубина 0,5 толщины стенки) на поверхности станка, заполненное маслом. Холодные концы термопар изолировались полихлорвиниловыми трубками. Температура измерялась в следующих точках (рис. 2):

- на внешнем торце шпиндельных бабок (точки 1, 2, 11, 12);
- на передней стенке шпиндельных бабок, вблизи ограждения зоны шлифования (точки 5, 6, 15, 16);
- на задней стенке шпиндельных бабок, вблизи ограждения зоны шлифования (точки 8, 9, 18, 19);
- на торцах станины, в верхней ее части (точки 3, 13);
- на передней и задней стенках станины, вблизи ограждения зоны шлифования (точки 7, 17, 10, 20);
- на торцах и середине станины, в нижней ее части (соответственно точки 4, 14 и 23);
- под кожухами шкивов (точки 21 и 22).

Для измерения температуры СОЖ, выходящей из зоны шлифования, и температуры окружающей среды использовался ртутный термометр (пределы измерения от 0 до 100 °С).

Запись показаний проводилась через каждые 0,5–1 часа в течение 5–7 часов работы станка. Для повышения достоверности результатов изменений эксперименты повторялись до трех раз. По результатам измерений определялись функциональные зависимости вида

$$\Delta T_{\text{изб}} = f(\tau) \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{изб}} = T_3 - T_{\text{о.с.}}$ – избыточная температура, градусы; T_3 – температура замера в точке, градусы; $T_{\text{о.с.}}$ – температура окружающей среды, градусы; τ – время работы станка, час.

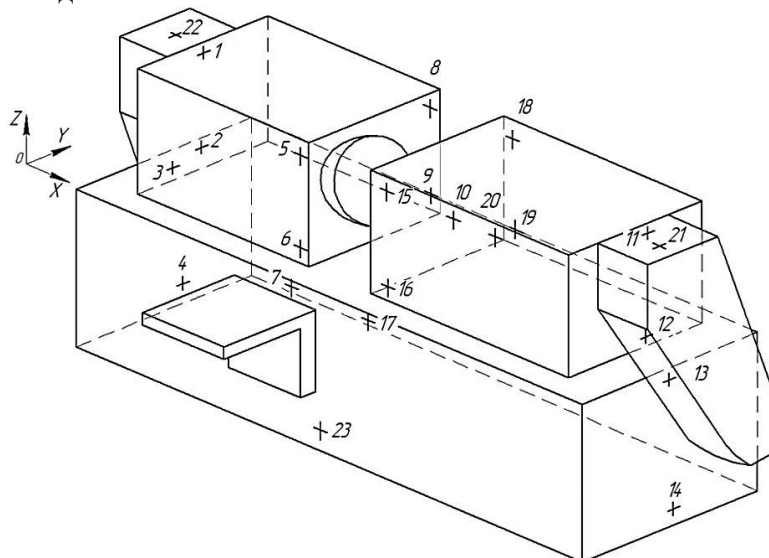


Рис. 2. Схема распределения контрольных точек измерения температур (редуктор с диском подачи не показаны)

Методика измерения изменений взаимного углового положения кругов. Для оценки взаимного положения технологической базы (диска подачи) и инструмента (двух абразивных кругов) была разработана методика, учитывающая имеющиеся сведения о тепловых деформациях торцешлифовальных станков. Как было сказано ранее, перемещение кругов происходит по всем трем осям координат, из которых только перемещение в плоскости YOZ, проходящей через оси шпинделей перпендикулярно станине станка, оказывают существенное влияние на точность обработки, так как величина их перемещений соизмерима с величиной непараллельности торцов кругов, устанавливаемой для формирования зоны шлифования. Необходимо измерять перемещения инструмента во время вращения шпинделей, так как даже краткая их остановка приводит к неточному определению их положения во время работы. Оценка тепловых перемещений инструмента должна проводиться относительно базовой плоскости перемещения заготовок в зоне обработки. Для реализации выдвинутых условий был использован принцип пневматического упора, конструктивная схема которого представлена на рис. 3.

На оси редуктора подачи был закреплен рычаг 4, на конце которого располагались два пневматических сопла 5, каждое для своего круга. Измерительной поверхностью служили торцы фланцев шпинделей, что позволяло поднять точ-

ность отсчета показаний по сравнению с абразивной поверхностью круга. Изменение положения фланца шпинделя относительно плоскости подачи определилось по двум диаметрально расположенным точкам, соответствующим двум положениям рычага 1.

Измерение выполнялось следующим образом. Рычаг устанавливался в положение I, а пиноль (фланец шпинделя) подводилась к соплу до тех пор, пока стрелка сильфонного датчика (6) не занимала определенного положения, принимаемого за «0». На отсчетном устройстве станка, показывающем величину осевого перемещения пиноли, также фиксировалось первоначальное значение – «0». Затем измерительный рычаг с соплом переводился в положение II и перемещением пиноли вперед или назад, стрелка сильфонного датчика устанавливалась на «0». На отсчетной шкале ЧПУ снимались показания, которые указывали на какую величину положение в точке II отличалось от положения в точке I, принятой за нулевое. Аналогичный замер проводился на фланце второго шпинделя. Использование принципа пневматического упора позволило измерять положение фланцев шпинделей без их остановки, так как измерительное сопло не контактировало с вращающимся шпинделем.

Измерение положения фланцев шпинделей производилось параллельно с определением температур, первые два часа через каждые 30 минут, а потом – через каждый час работы станка.

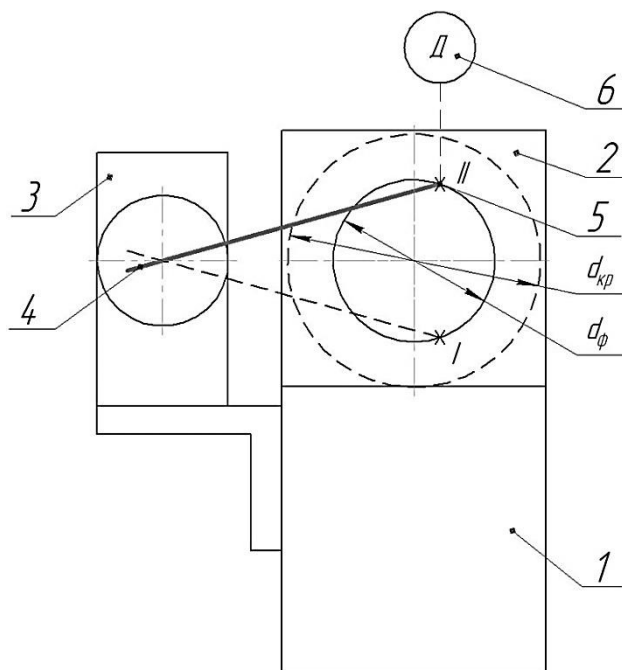


Рис. 3. Конструктивная схема замера положения фланцев шпинделей:
1 – станок; 2 – шпиндельная бабка; 3 – редуктор подачи; 4 – рычаг; 5 – пневматическое сопло;
6 – сифонный датчик; $d_{кр}$ – диаметр шлифовального круга; $d_{ф}$ – диаметр фланца

Время непрерывной работы станка 5–7 часов. Каждый эксперимент повторялся до трех раз, для повышения достоверности результатов. Полученные отклонения (Δ_T^B) фланцев шпинделей пересчитывались на диаметр круга и определялись функциональные зависимости вида

$$\Delta_T^B = f(\tau) \quad (2)$$

$$\Delta_T^B = f(t_{сож}) \quad (3)$$

где τ – время работы станка, час.; $t_{сож}$ – температура СОЖ на выходе из станка, градусы.

Методика измерения погрешности обработки. В качестве основной характеристики точности обработки было принято торцовое биение ролика. Измерение торцового биения ролика производилось по следующей методике: ролик устанавливался в призму; при помощи резинового ролика приводился во вращение и прижимался к упору на уровне его оси; наконечник измерительной головки устанавливался на наружном радиусе торца ролика; максимальная разность показаний головки за один оборот ролика характеризовала его биение (цена деления измерительной головки 0,5 мкм).

С учетом опыта использования двусторонних торцешлифовальных станков были выбраны абразивные круги и следующие условия:

- способ подачи СОЖ: разбрызгиванием через сопло, установленное поверх кругов и через отверстия в шпинделях;

- режимы правки: компенсация износа кругов проводилась от прибора автоматически, величина компенсации – 2 мкм;

- режимы обработки: подача регламентировалась заданной производительностью 10000 шт./час, что соответствовало скорости подачи изделий – 5,3 м/мин; припуск на обработку – 0,05–0,07 мм; частота вращения кругов 900 об/мин, что соответствовало скорости резания на периферии круга – 28 м/с;

- взаимное положение кругов (настройка): в вертикальной плоскости расстояние между верхними кромками кругов составляло 0,052 мм, в горизонтальной плоскости расстояние между кромками кругов на входе в зону обработки составляло 0,4 мм.

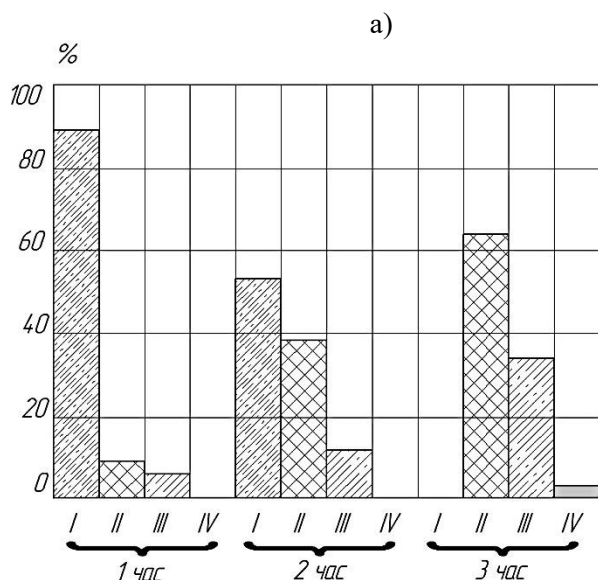
Шлифование цилиндрических коротких роликов диаметром 18 мм производилось на двустороннем торцешлифовальном станке модели 3А343АДФ2.

В ходе подготовки станка, определения рациональных режимов и оптимальной настройки было выполнено шлифование торцов роликов. Прошлифовано три контрольных партий по 3000 штук в каждой.

Контроль качества шлифования проводился по временной выборке – 5 роликов через каждые 10 мин. в течение всего времени шлифования (3 часа работы станка). В фиксированное время из потока цилиндрических роликов брали по 5 штук и одновременно измеряли температуру характерных точек станка и температуру СОЖ. Мощность шлифования оценивалась согласно разработанным методикам. Замеры мощности проводились через каждые 5 минут работы станка. Результаты

замеров мощности показали, что мощность шлифования колебалась в пределах от 7 до 12 кВт, а мощность холостого хода составила 5,5 кВт.

Обработка результатов контроля качества шлифования показала, что рассеяние длины роликов колебалось до 11 мкм, выпуклость торцов – до 3 мкм, шероховатость торцов (R_a) – от 0,2 до 0,09 мкм (т.е. в пределах требуемых степеней точности первой и второй по ГОСТ 22696–2013); прижоги не фиксировались.



Результаты контроля качества шлифования по параметру «торцовое биение» представлены на рис. 4 (I, II, III, IV – степени точности по ГОСТ 22696–2013). Из рисунка видно, что I степень точности обработки для роликов обеспечивалась только в первые два часа работы станка. Последовательный рост тепловых деформаций приводил к существенному росту погрешностей обработки. Начиная с третьего часа непрерывной работы станка, достигалась только допустимая вторая степень точности ролика.

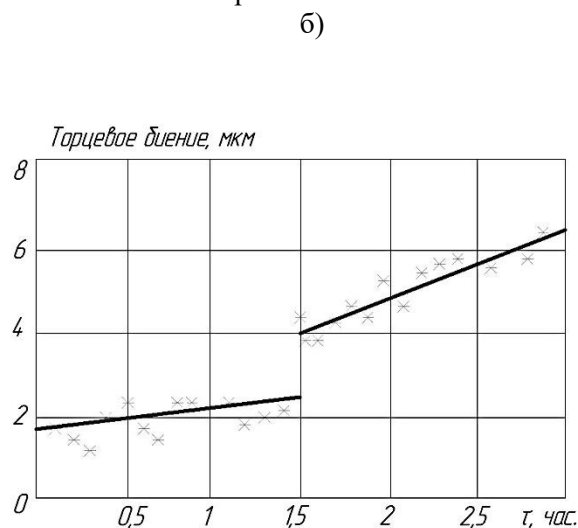


Рис. 4. Изменение точности обработки деталей (торцовое биение во времени): а) балансы точности обработки; б) результаты эксперимента

Выводы. Предложенные в работе методики экспериментальных исследований теплового поведения и погрешности обработки двустороннего торцешлифовального станка позволяют проводить доводку станка в условиях реального производства. При этом предварительно проведенные натурные испытания двустороннего торцешлифовального станка показали, что при шлифовании партии цилиндрических роликов избыточные температуры распределились неравномерно по узлам станка как на холостом ходу, так и при шлифовании. Наибольшую избыточную температуру при работе на холостом ходу имели торцы шпиндельных бабок и станины, а при шлифовании – поверхности узлов станка, находящиеся в непосредственной близости от зоны шлифования. Характер изменения избыточных температур характерных точек и СОЖ при имитации процесса шлифования на станке полностью совпал с экспериментальными данными, полученными на работающем станке.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (Российский фонд фундаментальных исследований) и Оренбургской области в рамках научного проекта № 19-48-560001.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bryan J. International status of thermal error research // Ann CIRP. 1990. Vol. 39. Is.2. Pp.645–656
2. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение. 1986, 336 с.
3. Zhou Z.D., Gui L., Tan Y.G., Liu M.Y., Liu Y., Li R.Y. Actualities and development of heavy-duty CNC machine tool thermal error monitoring technology // Chin. J. Mech. Eng. 2017. Vol. 30. Is. 5. Pp. 1262–1281.
4. Liang Y., Su H., Lu L., Chen W., Sun Y., Zhang P. Thermal optimization of an ultra-precision machine tool by the thermal displacement decomposition and counteraction method // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2015. Vol.76. Is.1-4. Pp. 635–645.
5. Putz M., Richter C., Regel J., Bräunig M. Industrial consideration of thermal issues in machine tools // Prod. Eng. Res. Devel. 2018. Vol. 12. Is. 6 Pp. 723–736.
6. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E., Donmez M. A., Knapp W., Härtig F., Wendt K., Moriwaki T., Shore P., Schmitt R., Brecher C., Würz T., Wegener K. Thermal issues in machine tools // Annals of the CIRP. 2012. Vol. 61. Is. 2. Pp. 771–

792.

7. Shi X., Zhu K., Wang W., Fan L., Gao J. A thermal characteristic analytic model considering cutting fluid thermal effect for gear grinding machine under load // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. Vol. 99. Is. 5-8. Pp. 1755–1769.

8. Shi X., Wang W., Mu Y. Yang X. Thermal characteristics testing and thermal error modeling on a worm gear grinding machine considering cutting fluid thermal effect // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. Pp. 1–13.

9. Ortega N., Bravo H., Pombo I., Sanchez J.A., Vidal G. Thermal analysis of creep feed grinding // *Procedia Engineering.* 2015. Vol. 132. Pp. 1061–1068.

10. Wang S., Zhou B., Fang C., Sun S. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. Vol. 91. Is. 1-4. Pp. 577–587.

11. Fang B., Gu T., Ye D., Luo T. An improved thermo-mechanical model for vertical machining center // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 87. Is.9-12. Pp. 2581–2592.

12. Cao H., Zhu L., Li X., Chen P., Chen Y. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 86. Is. 5-8. Pp. 1739–1751.

13. 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.

14. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Марусич К.В. Методика реализации алгоритмов

компенсации температурной погрешности станка с ЧПУ // *Справочник. Инженерный журнал с приложением.* 2018. № 3 (252). С. 23–29.

15. Нассер А.А. Интеллектуальная система управления компенсацией температурных деформаций / Новые информационные технологии и системы: сб. научных статей XII Междунар. науч.-техн. конф. // Пензенский государственный университет (Пенза, 17-19 ноября 2015 г.), Пенза: Изд-во Пензенский государственный университет, 2015. С. 233–235.

16. Горбунов В.П., Григорьев В.Ф. Влияние тепловых деформаций многоцелевого станка на показатели точности / Инновационные технологии в машиностроении: сб. научных трудов Междунар. науч.-практ. конф. // Полоцкий государственный университет (Новополоцк, 28-29 октября 2015 г.), Новополоцк: Изд-во Полоцкий государственный университет, 2015. С. 50–54.

17. Ягопольский А.Г., Крикунов Д.Э. Анализ коррекции тепловых деформаций в станках // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение.* 2014. № 5 (98). С. 98-105.

18. Никитина И.П., Поляков А.Н. Проблемы теплоустойчивости двусторонних торцешлифовальных станков / Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. научных трудов XIII Междунар. науч.-практ. конф. // Юго-Западный государственный университет (Курск, 28 июня 2019 г.), Курск: Изд-во Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 6–12.

Информация об авторах

Никитина Инна Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: innanikitina@list.ru. Оренбургский государственный университет, Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

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

Поступила в августе 2019 г.

© Никитина И.П., Поляков А.Н., 2019

***Nikitina I.P., Polyakov A.N.**

*Orenburg State University
Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13
E-mail: innanikitina@list.ru

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE AND ACCURACY CHARACTERISTICS OF DOUBLE-SIDED FACE GRINDING MACHINE

Abstract. *The paper proposes a methodology for experimental studies of double-sided face grinding machines on the criterion of heat resistance, including: method of simulating a grinding process; measurement*

of temperature; measurement of changes in relative angular position of the circles; the measurement of processing errors. The proposed methods for experimental studies of the thermal behavior and errors in the machining of a double-sided face grinder allow for fine-tuning of the machine under production conditions. At the same time, preliminary tests of a double-sided face grinder show that when grinding an industrial batch of cylindrical rollers, excessive temperatures are distributed unevenly across the machine nodes both at idle and during grinding. The ends of the spindle heads and the stand have the greatest excess temperature when working at idle, and when grinding - on the surface of the machine, located in close proximity to the grinding zone. The nature of changes in excess temperatures of characteristic points and coolant when simulating the grinding process on the machine completely coincided with the experimental data obtained on a working machine.

Keywords: face grinding machines, temperature deformations, heat resistance, improving accuracy, methods.

REFERENCES

1. Bryan J. International status of thermal error research. Ann CIRP. 1990. Vol. 39. Is.2. Pp.645–656
2. Reshetov D.N., Portman V.T. Precision machine tools [Tochnost' metallorazhishchih stankov]. M.: Mashinostroenie. 1986, 336 p. (rus)
3. Zhou Z.D., Gui L., Tan Y.G., Liu M.Y., Liu Y., Li R.Y. Actualities and development of heavy-duty CNC machine tool thermal error monitoring technology. Chin. J. Mech. Eng. 2017. Vol. 30. Is. 5. Pp. 1262-1281.
4. Liang Y., Su H., Lu L., Chen W., Sun Y., Zhang P. Thermal optimization of an ultra-precision machine tool by the thermal displacement decomposition and counteraction method. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2015. Vol.76. Is.1-4. Pp.: 635-645.
5. Putz M., Richter C., Regel J., Bräunig M. Industrial consideration of thermal issues in machine tools. Prod. Eng. Res. Devel. 2018. Vol. 12. Is. 6 Pp. 723–736.
6. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E., Donmez M. A., Knapp W., Härtig F., Wendt K., Moriwaki T., Shore P., Schmitt R., Brecher C., Würz T., Wegener K. Thermal issues in machine tools. Annals of the CIRP. 2012. Vol. 61. Is. 2. Pp. 771–792.
7. Shi X., Zhu K., Wang W., Fan L., Gao J. A thermal characteristic analytic model considering cutting fluid thermal effect for gear grinding machine under load. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2018. Vol. 99. Is. 5-8. Pp. 1755–1769.
8. Shi X., Wang W., Mu Y. Yang X. Thermal characteristics testing and thermal error modeling on a worm gear grinding machine considering cutting fluid thermal effect. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019. Pp. 1–13.
9. Ortega N., Bravo H., Pombo I., Sanchez J.A., Vidal G. Thermal analysis of creep feed grinding. Procedia Engineering. 2015. Vol. 132. Pp. 1061–1068.
10. Wang S., Zhou B., Fang C., Sun S. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017. Vol. 91. Is. 1-4. Pp. 577–587.
11. Fang B., Gu T., Ye D., Luo T. An improved thermo-mechanical model for vertical machining center. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 87. Is. 9–12. Pp. 2581–2592.
12. Cao H., Zhu L., Li X., Chen P., Chen Y. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 86. Is. 5-8. Pp. 1739-1751.
13. Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfyonov I.V. The method of correction of the temperature error of the CNC machine [Metodika korrëktsii temperaturnoj pogreshnosti stanka s CHPU]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova. 2019. No. 3. Pp. 117–127. (rus)
14. Polyakov A.N., Goncharov A.N., Marusich K.V. The method of implementation of the algorithms for compensating the temperature error of the CNC machine [Metodika realizacii algoritmov kompensacii temperaturnoj pogreshnosti stanka s CHPU]. Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal s prilozheniem. 2018. No. 3 (252). Pp. 23–29. (rus)
15. Nasser A.A Intelligent temperature distortion control system [Intellektual'naya sistema upravleniya kompensaciej temperaturnyh deformacij]. XII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Novye informacionnye tekhnologii i sistemy». Penzenskij gosudarstvennyj universitet. 2015. Pp. 233–235. (rus)
16. Gorbunov V.P., Grigor'ev V.F. Influence of thermal deformations of a multi-purpose machine on accuracy rates [Vliyanie teplovyh deformacij mnogocelovogo stanka na pokazateli tochnosti]. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Innovacionnye tekhnologii v mashinostroenii». Polockij gosudarstvennyj universitet. 2015. Pp. 50–54. (rus)
17. YAgopol'skij A.G., Krikunov D.E. Analysis of the correction of thermal deformations in machine tools [Analiz korrëktsii teplovyh deformacij v stankah]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya: Mashinostroenie. 2014. No. 5 (98). Pp. 98–105. (rus)
18. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Problems of heat resistance of bilateral face grinding machines

[Problemy teploustojchivosti dvustoronnih torceshlifoval'nyh stankov]. XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Tekhnika i tekhnologii: puti innovacionnogo razvitiya». Yugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet. 2019. Pp. 6–12. (rus)

Information about the authors

Nikitina, Inna P. PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

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

Received in August 2019

Для цитирования:

Никитина И.П., Поляков А.Н. Экспериментальное исследование температурных и точностных характеристик двустороннего торцешлифовального станка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 112–120. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120

For citation:

Nikitina I.P., Polyakov A.N. Experimental investigation of the temperature and accuracy characteristics of double-sided face grinding machine. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 112–120. DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120