

*Л. Е. Пивовар, канд. техн. наук,
М. В. Киндрачук, д-р техн. наук., проф.,
И. Л. Пивовар*

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТОКАРНЫХ МНОГОШПИНДЕЛЬНЫХ АВТОМАТОВ

Национальный авиационный университет

Изучены факторы, влияющие на работоспособность станков. Показано, что для полного учета этих факторов необходимо учитывать изменение условий работы узлов трения при экстремальных режимах эксплуатации токарных многошпиндельных автоматов и отражать эти изменения в технических требованиях.

Вступление. Токарные многошпиндельные автоматы (ТМА) относятся к высокопроизводительному оборудованию. Высокая производительность ТМА достигается благодаря их конструктивным особенностям. Наиболее широкое распространение получили автоматы в шестишпиндельном исполнении с поворотом шпиндельного блока (ШБ) на одну или две индексации, то есть на 60° или 120° . Изготавливают автоматы в варианте, предназначенном для обработки деталей из прутков и труб, а также полуавтоматическом варианте для обработки деталей из штучных заготовок. Все автоматы работают в циклическом режиме. После завершения каждого цикла полной обработки деталей происходит быстрый отвод суппортов, расфиксация ШБ, подъем ШБ, его поворот на одну индексацию, быстрый подвод суппортов с одновременным опусканием ШБ в ложе, фиксацией ШБ в угловом положении. Цикл заканчивается полной обработкой детали.

Постановка задачи. Упрощенная конструкция основных узлов, обеспечивающих работоспособность и точность станков, приведена на рис. 1. Такими узлами являются ШБ 8, корпус ШБ 9, в ложе которого покоится ШБ, центральная направляющая продольного суппорта (ЦН) 7 и продольный суппорт (ПС) 5. Рабочие шпиндели 3 смонтированы на подшипниках 2 и 4. Центральная направляющая ПС запрессована в шпиндельный барабан. В угловом положении ШБ фиксируется механизмом

фиксации с одновременным его прижимом к ложе корпуса шпиндельного блока 9. Точность положения ШБ в осевом направлении обеспечивается прижимом его к опорным накладкам 14 посредством сжатия упругого элемента 13 при затягивании гайки 10.

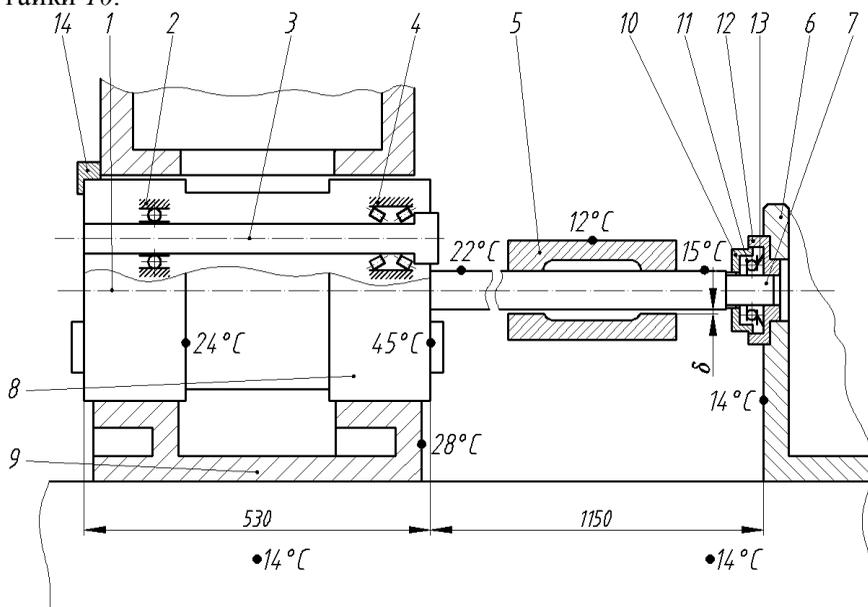


Рис. 1. Упрощенная конструкция и температурное поле узлов автомата мод. 1 Б265П-6К при частоте вращения шпинделей на холостом ходу $n = 805$ об/мин

Основные источники теплообразования сконцентрированы в зоне ШБ и в самом ШБ. Передние и задние опоры шпинделей имеют разное конструктивное исполнение и часто в них используют подшипники разных типов. Поскольку силы резания оказывают большее воздействие на передние опоры шпинделей 4, чем на задние 2, то в опорах выделяется разное количество тепла, что приводит к линейному и угловому смещениям шпинделей, а также к изменению размеров и формы ШБ [1]. Нагрев ШБ по переднему пояску в значительной степени повышается при применении охлаждающей жидкости с низкими теплофизическими свойствами, например сульфозрезола. Из-за неравномерного

нагрева опор ЦН изгибается. Кроме того, теплота от ШБ передается ЦН и от нее ПС. Распределение температуры по длине ЦН и ПС происходит по закону прямоугольного ребра бесконечной длины и свидетельствует об изменении формы и размеров ЦН и ПС в их продольном сечении. Поэтому необходимо оценить как все эти процессы влияют на работоспособность основных узлов на различных этапах производства и эксплуатации ТМА.

Обоснование выбора зазора между ПС и ЦН. При освоении станков повышенной точности гамм 1Б265 и 1Б290 с целью повышения их ресурса точности были внесены следующие изменения. Для станков гамм 1Б265 и 1Б290 зазор между ПС и ЦН был назначен 8...12 мкм. В станках гамм 1Б265 применен упругий элемент прижима ШБ к опорным накладкам с хорошей линейной характеристикой и жесткостью 1500 кг/мм. Центральная направляющая ПС выполнена из азотированной стали 38ХМЮА, а направляющие втулки ПС – из бронзы ОФ10-0,1.

В станках 1Б290 прижим ШБ к опорным накладкам осуществляется подпружиненными упругими элементами, расположенными в корпусе ШБ, которые воздействуют на поверхность шестерни поворота ШБ, прижимая его к опорным накладкам, т.е. ЦН получила возможность свободного удлинения под воздействием тепла. Центральная направляющая ПС выполнена – из азотированной стали 38ХМЮА, направляющие втулки ПС из цементированной стали 18ХГТ, запрессованными в корпус ПС.

При выпуске опытной серии в количестве 6 станков 1Б265-6К, которые эксплуатировались при охлаждении сульфозрезолом от индивидуальной системы станка, на всех станках были случаи заедания ПС на ЦН. Причем на некоторых станках это повторялось 2–3 раза. Заедание ПС на ЦН происходит на первых циклах работы нагретого станка после его остановки и охлаждения в течение некоторого времени (например, для подналадки, перерыва на обед рабочего). Теплоемкость ШБ значительно больше теплоемкости ПС и остывает ШБ медленнее, чем ПС. При подналадке станка ПС отводят от ШБ в крайнее правое положение (рис. 1). В этом случае скорость охлаждения ПС максимальна, а избыточная температура ЦН в ее передней части поддерживается теплотой, отдаваемой ШБ.

Поэтому при последующем перемещении ПС в крайнее переднее положение (рис. 1) зазор между ЦН и ПС будет наименьшим и возможно заклинивание последнего.

Для обеспечения длительной работоспособности и точности автомата необходимый первоначальный зазор δ между ПС и ЦН назначают с учетом изменения их размеров и искривления оси ЦН под влиянием тепловых деформаций:

$$\delta > \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3, \quad (1)$$

где Δ_1 – изменение зазора вследствие деформации ЦН, вызванной разницей тепловых деформаций ее опор; Δ_2 – изменение зазора вследствие неравномерного нагрева ЦН на длине хода ПС и самого ПС на длине передней направляющей втулки; Δ_3 – изменение зазора вследствие деформации ЦН, вызванной неточностью выставки станка на фундаменте.

Составляющие формулы (1) можно определить по результатам исследования области границ тепловых режимов работы ТМА в условиях эксплуатации.

Обследованию подвергались станки, эксплуатируемые в экстремальных условиях эксплуатации. В качестве экстремальных условий выбраны условия эксплуатации, которые характеризуются:

- минимальными скоростями резания (применение фасонирования поверхности широкими резцами) и наименьшей интенсивностью отвода тепла;

- максимальными скоростями резания (т.е. условиями повышенного теплообразования) и условиями повышенного отвода тепла.

Для определения верхней границы области тепловых состояний станков обследованию подвергались станки 1265М-6 (30 шт), на которых обрабатывались кольца радиальных подшипников типа 305, 205, 180603 и ролики рулевой сошки 776701, 776801 из стали ШХ15 при $V_{рез} = 26...29$ м/мин ($n = 150...200$ об/мин) и охлаждении сульфореолом от индивидуальных систем охлаждения станков. При этом проводились замеры средней температуры на участках звеньев, определяющих положение оси ШБ и ЦН ПС: ШБ у передних и задних опор шпинделей и передней стенки коробки передач. Рассеивание величин замеров избыточной температуры ШБ у передних опор шпинделей подчиняется закону нормального

распределения и характеризуется параметрами: среднее значение $t = 28 \text{ }^\circ\text{C}$, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 5,5 \text{ }^\circ\text{C}$ для всех обследованных станков.

Средняя избыточная температура у задних опор шпинделей была на $8\text{--}12 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже, чем у передних опор шпинделей, средняя избыточная температура стенки коробки передач также на $8\text{--}12 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже, чем у передних опор шпинделей. Температура охлаждающей жидкости каждого станка превышала температуру ШБ у передних опор шпинделей на $2\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$ в установленном режиме работы. Разница нагрева ЦН на длине хода ПС достигает $3 \text{ }^\circ\text{C}$ и самого ПС до $2 \text{ }^\circ\text{C}$ на длине передней втулки.

Для определения нижней границы области тепловых состояний станков обследованию подвергались станки 1265ПМ-6, 30 штук, на которых обрабатывались кольца конических подшипников типов 7608, 7510, 27709 из стали ШХ15 при $V_{\text{рез}} = 101\text{--}133 \text{ м/мин}$ ($n = 450\text{--}500 \text{ об/мин}$) и охлаждении эмульсией (раствор эмульсола на водной основе) от централизованной системы. При этом производились замеры средней температуры на участках звеньев, определяющих положение оси ШБ и ЦН ПС: ШБ у передних и задних опор шпинделей и передней стенки коробки передач. Рассеивание величин замеров избыточной температуры ШБ у передних опор шпинделей подчиняется закону нормального распределения и характеризуется параметрами: $t_1 = 7 \text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma_1 = 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ для всех обследованных станков. Средняя избыточная температура у задних опор шпинделей была на $2\text{--}4 \text{ }^\circ\text{C}$ выше, чем у передних опор шпинделей, средняя избыточная температура стенки коробки передач – не более, чем на $1\text{--}2 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже температуры нагрева ШБ у передних опор шпинделей. Температура охлаждающей жидкости не превышала температуры окружающей среды и составляла $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Разница нагрева ЦН на длине хода ПС достигает $1 \text{ }^\circ\text{C}$ и самого ПС – до $1 \text{ }^\circ\text{C}$ на длине передней втулки.

По результатам измерения температур деталей можно определить изменение их размеров, а следовательно, определить искривление оси ШБ и ЦН ПС. Исследования показали, что в установленном тепловом режиме оси ШБ и ЦН ПС обследованных автоматов искривлены (рис. 2).

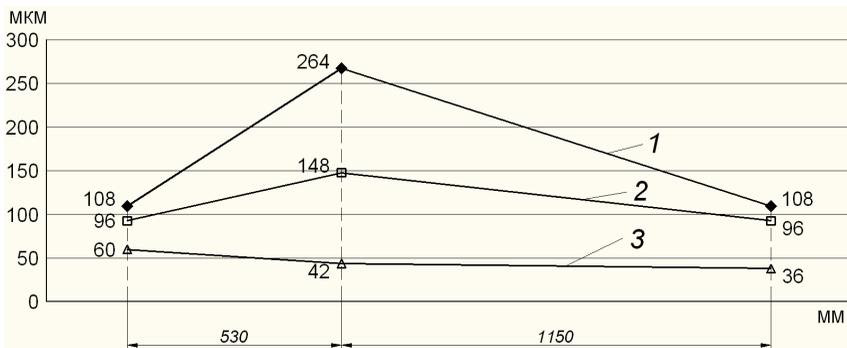


Рис. 2. Тепловые смещения оси ШБ и ЦН ПС в установившемся тепловом режиме работы автоматов 1265 в эксплуатации: \blacklozenge – Кривая 1 – искривление оси ШБ и ЦН, соответствующее верхней области теплового режима работы автоматов при охлаждении сульфифрезолом; \square – Кривая 2 – искривление оси ШБ и ЦН, соответствующее средним значениям теплового режима работы автоматов при охлаждении сульфифрезолом от индивидуальной системы станка; \triangle – Кривая 3 – искривление оси ШБ и ЦН, соответствующее средним значениям теплового режима работы автоматов при охлаждении эмульсией на водной основе от централизованной системы

При охлаждении сульфифрезолом максимальное искривление оси рассматриваемых узлов достигало 156 мкм. В этом случае изменялись условия контакта деталей и зазор δ .

При охлаждении эмульсией максимальное искривление оси этих же узлов достигало 24 мкм.

Если допустить, что при изгибе ось ЦН принимает форму дуги окружности, то радиус ее кривизны, при котором произойдет заклинивание ПС:

$$R = 0,5 l_0 l_1 / (\delta - \Delta_2), \quad (2)$$

где l_0 – длина направляющей втулки ПС, l_1 – длина ПС.

При этом деформация (стрелка сегмента) оси ЦН на длине ПС

$$f = 2R \sin^2(\varphi/4), \quad (3)$$

где $\varphi = l_1/R$.

Если принять $\delta = 20$ мкм и вместо l_1 в формулу (2) подставить общую длину ШБ и ЦН, то допустимое искривление оси ШБ и ЦН для станка модели 1Б265-6К равно 110 мкм и $f = 12,7$ мкм.

Полученные значения близки к приведенным на рис. 2 для станков, эксплуатируемых с охлаждением сульфифрезолом. При совпадении направлений деформаций Δ_1 и Δ_3 (наиболее неблагоприятный случай) $f = \Delta_1 + \Delta_3$. Учитывая точность выставки станка (в продольном направлении) по техническим условиям (0,02 мм на длине 1 м), соотношение длины ПС и длины ШБ с ЦН, а также зависимость (3), имеем

$$\Delta_3 = 20 \times 12,7 / 110 = 2,4 \text{ мкм.}$$

Тогда $\Delta_1 = 12,7 - 2,4 \cong 10 \text{ мкм}$, а $\Delta_3 = 1 \text{ мкм}$ на длине ПС.

Для станков гамм 1Б265 и 1Б290 при $\delta = 20$ и 25 мкм допустимо изменение зазора $\Delta_1 = 10 \dots 12 \text{ мкм}$. Вследствие неравномерности нагрева ЦН (до 3°C на длине хода ПС) и самого ПС (до 2°C на длине передней втулки при охлаждении сульфифрезолом) принимаем Δ_2 не более 7 мкм для станков гаммы 1Б265 и Δ_2 не более 9 мкм для станков гаммы 1Б290. Следовательно, для указанных гамм станков зазор $\delta > 10 + 7 + 1 = 18 \text{ мкм}$ и $\delta > 12 + 9 + 1 = 22 \text{ мкм}$ соответственно.

Аналогичные расчеты выполним для станков, эксплуатируемых при охлаждении эмульсией от централизованной системы:

$$l_1 = 555 - 112 = 443 \text{ мм;}$$

$$R = 4770769 \text{ мм, } f = 5,1 \text{ мкм;}$$

$$\Delta_1 = 5,1 - 2,4 = 2,7 \text{ мкм; } \Delta_2 = 1,4 + 1,4 = 2,8 \text{ мкм;}$$

$$\Delta_3 = 1 \text{ мкм на длине ПС;}$$

$$\delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 2,7 + 2,8 + 1 = 6,5 \text{ мкм для станков 1Б265.}$$

$$\text{Для станков 1Б290: } \delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 2,7 + 3,6 + 1 = 7,3 \text{ мкм.}$$

Приведенные результаты расчетов показывают, что только при охлаждении станков эмульсией от централизованной системы охлаждения станки работоспособны, т.е. расчетные значения зазора между ПС и ЦН меньше назначенных по техническим условиям. Согласно техническим условиям зазор между ПС и ЦН был установлен $8 \dots 12 \text{ мкм}$.

При зазорах, соответствующих техническим условиям, и при охлаждении сульфифрезолом от индивидуальной системы станка автоматы неработоспособны. На основании проведенных исследований рекомендуется принимать $\delta = 20 \dots 25 \text{ мкм}$ для

автоматов 1Б265 и $\delta = 25...30$ мкм для автоматов 1Б290 для всех условий эксплуатации.

Приведенные выше результаты исследований свидетельствуют о целесообразности изготовления ТМА для конкретных условий эксплуатации.

Обоснование технических условий на величину подъема ШБ. С целью исключения износа базовых поверхностей ШБ и его ложа автоматы снабжены механизмами, обеспечивающими подъем ШБ над его ложем и его поворот из позиции в позицию на временной опоре. Несмотря на это в эксплуатации нередки случаи износа ШБ и его ложа как одновременно по переднему и заднему пояску ШБ, так и только по переднему, что свидетельствует о недостаточной величине подъема ШБ над ложем. Следует заметить, что колодка подъема расположена вблизи заднего пояска ложа (у задних опор шпинделей), и техническими условиями для станков 1Б265 величина подъема установлена в размере 0,2 ... 0,4 мм.

Необходимо проанализировать, что происходит с положением ШБ при измерении его величины подъема на холодном станке, а также при установившемся тепловом режиме работы. Из анализа температурного поля (см. рис 1) следует, что ШБ поднимается над передним пояском ложа, если колодка подъема сместится на величину

$$h = \Delta c_1 - \Delta c_2,$$

где Δc_1 и Δc_2 – смещение оси ШБ соответственно у передних и задних опор шпинделей вследствие тепловых деформаций.

На станке 1Б265-6К изменение величины подъема ШБ над передним пояском ложа оценивается по величине смещения ЦН ПС. Для этого с помощью одного индикатора контролируют смещение заднего пояска ШБ, а второго – смещение ЦН ПС у передних опор шпинделей при подъеме и повороте ШБ на колодке подъема.

В процессе разогрева станка подъем ШБ у передних опор уменьшается. Подъем ШБ у колодки в процессе испытания h_k равен 0,4 мм. В установившемся режиме работы автомата первоначальный подъем ШБ над передним пояском составлял 0,1 мм. Уменьшение и последующая стабилизация подъема ШБ у передних опор шпинделей связаны с изменением и стабилизацией температуры нагрева ШБ в зонах передних и задних опор шпинделей. Если величина подъема

ШБ h_k у задних опор шпинделей меньше 0,3 мм, то ШБ будет касаться переднего пояска ложа. Следует заметить, что величина подъема ШБ над передним пояском ложа уменьшается также на величину деформации ЦН под воздействием веса ШБ и ПС с оснасткой.

Обоснование технических условий на минимальную величину подъема ШБ проведем также с учетом анализа тепловых смещений и искривления оси ШБ и ЦН при эксплуатации автоматов в области, соответствующей верхней области тепловых режимов работы при охлаждении сульфозрезолом (рис 2, кривая 1). Смещение оси ШБ определяется величиной разницы смещения ШБ в районе передних и задних подшипников шпинделей: $264 - 108 = 156$ мкм.

Если учесть эту величину и величину деформации ЦН под действием веса ШБ и оснастки, то можно сделать вывод, что величина подъема ШБ должна быть установлена не меньше 0,3 мм. Следовательно, как по результатам испытаний станка на холостом ходу, так и в процессе изучения смещений оси ШБ в экстремальных условиях эксплуатации установлено, что при назначении технических условий на подъем ШБ необходимо учитывать деформацию ЦН под действием веса ШБ и ПС с оснасткой, а также разницу тепловых деформаций ШБ по переднему и заднему пояском при экстремальном тепловом режиме эксплуатации станков.

Для автоматов гамм 1Б265 и 1Б290 рекомендуется принимать минимальным подъем ШБ по заднему пояску в размере 0,3 и 0,4 мм соответственно.

Обоснование технических условий на горизонтальное смещение ШБ при его повороте. Во время поворота ШБ под воздействием силы привода происходит его смещение в горизонтальной плоскости (рис. 3). Усилие, смещающее ШБ в горизонтальной плоскости, воспринимается боковыми роликами поддержки. Боковые ролики установлены на эксцентриковой оси. При этом между поверхностью ШБ и наружной поверхностью роликов устанавливался зазор 0,02...0,04 мм. Узлы роликов поддержки ШБ обладают определенной податливостью. Поэтому при установке боковых роликов без учета их отжима силой поворота могут быть случаи касания ШБ боковой поверхности

ложа и следовательно наблюдаются случаи износа и повреждения поверхностей ШБ по заднему пояску и его ложа.

С достаточной точностью допустимое горизонтальное смещение ШБ $x_{\text{доп}}$ во время его поворота на колодке подъема можно определить по формуле

$$x_{\text{доп}} = h_{\text{min}} \operatorname{tg} \alpha,$$

где $\alpha = (180 - \psi)/2$; h_{min} – минимальная величина подъема ШБ согласно ТУ; ψ – угол охвата ШБ ложем.

Для автоматов 1Б265: $\psi = 150^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $h_{\text{min}} = 0,3$ мм, $x_{\text{доп}} = 0,08$ мм.

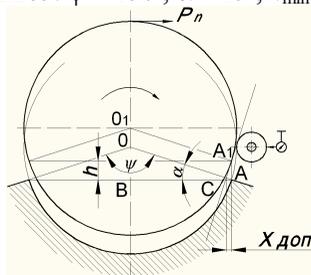


Рис. 3. Схема для определения допустимого горизонтального смещения шпиндельного блока при его повороте

Выборочный контроль величины смещения ШБ у переднего ролика поддержки на 28 автоматах 1А290 показал, что при допустимой величине смещения ШБ $x_{\text{доп}} = 0,11$ мм на 43% автоматов смещение находилось в пределах 0,07...0,11 мм, а на 57% автоматов оно составляло 0,12...0,19 мм. Соответственно на автоматах, на которых смещение ШБ было меньше допустимого, следов износа поверхности по заднему пояску не наблюдалось, а где смещение ШБ было больше 0,11 мм – все без исключения ШБ имели поврежденную поверхность по заднему пояску.

Таким образом, смещение ШБ автоматов в горизонтальной плоскости следует контролировать во время поворота последнего. Величина горизонтального смещения ШБ у переднего ролика поддержки должна находиться в пределах:

0,06...0,08 мм – для автоматов гаммы 1Б265;

0,08...0,11 мм – для автоматов гаммы 1Б290.

Нижний предел устанавливается с целью обеспечения возможности свободного теплового расширения ШБ.

Вывод. Таким образом, для наиболее полного учета факторов, влияющих на работоспособность станков, необходимо учитывать изменение условий работы их узлов при экстремальных режимах эксплуатации и отражать эти изменения в технических требованиях.

Список литературы

1. Пивовар Л.Е., Киловатый Б.Я. Влияние тепловых деформаций на работоспособность токарных многошпиндельных автоматов. //Станки и инструмент – 1990 – №6 – С.12–14.

Пивовар Л.Е., Кіндрачук М.В., Пивовар І.Л. Працездатність токарних багатошпиндельних автоматів // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 53. – С. 128–138.

Вивчено фактори, що впливають на працездатність верстатів. Показано, що для повного обліку цих факторів необхідно враховувати зміну умов роботи вузлів тертя при екстремальних режимах експлуатації токарних багатошпиндельних автоматів і відобразити ці зміни в технічних вимогах.

Рис. 3, список літ.: 1 найм.

The efficiency of turning multi spindle machines

The factors affecting the efficiency of machines are considered. It is shown that for a full account of these factors must take into account changing conditions of friction under extreme operating conditions lathe multi spindle machines, and reflect these changes in specifications.

Стаття надійшла до редакції 10.06.10