
УДК 621.787

А. М. Довгалев

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ОБРАБОТКИ ПРИ
СОВМЕЩЕННОМ МАГНИТНО-ВИБРОДИНАМИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ**

UDC 621.787

A. M. Dovgalev

**ADAPTIVE CONTROL OF MACHINING QUALITY IN COMBINED MAGNETO-
VIBRODYNAMIC STRENGTHENING**

Аннотация

В работе представлены системы адаптивного управления поверхностями деталей машин применительно к процессу совмещенного магнитно-вибродинамического упрочнения. Описана интеллектуальная система адаптивного управления точностью получения диаметрального размера отверстия детали при комбинированной обработке резанием (абразивной обработке) и магнитно-вибродинамическом накатывании. Приведены сведения о конструкциях управляемых инструментов для совмещенной упрочняющей обработки вращающимся магнитным полем и магнитно-вибродинамическим накатыванием.

Ключевые слова:

адаптивная система, управление точностью, качество обработки, магнитно-динамическое накатывание, магнитное поле, совмещенная обработка, управляемый инструмент.

Abstract

The paper presents adaptive control systems to monitor the quality of machining of the surface layer of machine parts during the process of combined magneto-vibrodynamic strengthening. The smart adaptive control system is described which monitors the accuracy of dynamic size of a machine part aperture during combined machining by means of cutting (abrasive machining) and magneto-vibrodynamic rolling. The data on designs of controlled tools for the combined strengthening treatment by rotating magnetic field and magneto-vibrodynamic roll forming is presented.

Key words:

adaptive system, accuracy control, quality of machining, magneto-dynamic roll forming, magnetic field, combined machining, controlled tool.

Введение

Долговечность технических систем во многом зависит от качества обработки входящих в них ответственных деталей машин, которая, в свою очередь, определяется комплексом показателей формируемой поверхности: характеристиками микрорельефа (шероховатостью, волнистостью, сеткой сопрягаемых микролунок и т. д.); размерной и геометрической точностью; параметрами упрочнения поверхностного

слоя детали. Как правило, требуемое качество обработки обеспечивается на финишных операциях технологического процесса изготовления детали методами отделочно-упрочняющей обработки, в том числе поверхностным пластическим деформированием.

К числу перспективных относится метод совмещенной упрочняющей обработки поверхностей ферромагнитных деталей машин магнитным полем и магнитно-вибродинамическим накатыванием.

ванием. Согласно методу, на поверхность детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем и деформирующими шарами, получающими рабочие колебательные движения от магнитной системы инструмента [1, 2].

Однако в процессе совмещенного магнитно-вибродинамического накатывания поверхностей деталей имеет место непостоянство факторов, действующих на технологическую систему и отрицательно влияющих на выходные параметры обработки. К таким факторам относятся изменяемые физико-механические свойства материала детали, неравномерная жесткость элементов технологической системы, колебание натяга деформирования, различие шероховатости поверхности, размерной и геометрической точности заготовок, износ деформирующих шаров инструмента, тепловые деформации и т. д.

Существенным резервом повышения качества обработки деталей на металлорежущих станках является применение систем адаптивного управления [3].

Использование систем адаптивного управления точностью обработки широко исследовано в [4, 5].

Большой интерес вызывают исследования по созданию систем адаптивного управления качеством обработки деталей применительно к поверхностному пластическому деформированию [6].

Однако существующие системы адаптивного управления качеством обработки не применяются для динамических методов поверхностного пластического деформирования, в том числе для совмещенного магнитно-вибродинамического накатывания.

Постановка задачи

В связи с этим важным направлением усовершенствования технологии отделочно-упрочняющей обработки де-

талей машин является разработка систем адаптивного управления качеством при совмещенном магнитно-вибродинамическом накатывании. Перспективной является также разработка управляемых инструментов для реализации систем адаптивного управления, позволяющих осуществлять регулировочное воздействие на процесс совмещенного магнитно-вибродинамического упрочнения.

Основная часть

В соответствии с поставленной задачей разработана система адаптивного управления характеристиками упрочнения внутренней поверхности втулок применительно к совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и магнитно-вибродинамическим накатыванием, схема осуществления которой приведена на рис. 1.

Для реализации указанной системы разработан специальный управляемый инструмент, содержащий оправку 1, диски 2, 3, кольцевую камеру 4, деформирующие шары 5, обойму 6 с радиальными отверстиями 7, цилиндрические магнитопроводы 8, цилиндрические постоянные магниты 9, штифты 10, тарельчатые пружины 11, стакан 12 с отверстием 13 и конусом 14, управляющий электромагнит 15 с электрической обмоткой 16 и отверстием 17. Оправка 1, обойма 6, диски 2, 3, штифты 10, тарельчатые пружины 11 изготовлены из немагнитопроводных материалов.

Деформирующие шары 5 свободно расположены в кольцевой камере 4 инструмента. Цилиндрические магнитопроводы 8 и постоянные цилиндрические магниты 9 установлены с возможностью регулировочного перемещения по радиальным отверстиям 7 обоймы 6. Штифты 10 закреплены на цилиндрических магнитопроводах 8 и взаимодействуют с конусом 14 стакана 12, который надет отверстием 13 на оправку 1 с возможностью перемещения по ней и поджат в осевом направлении пружиной 18.

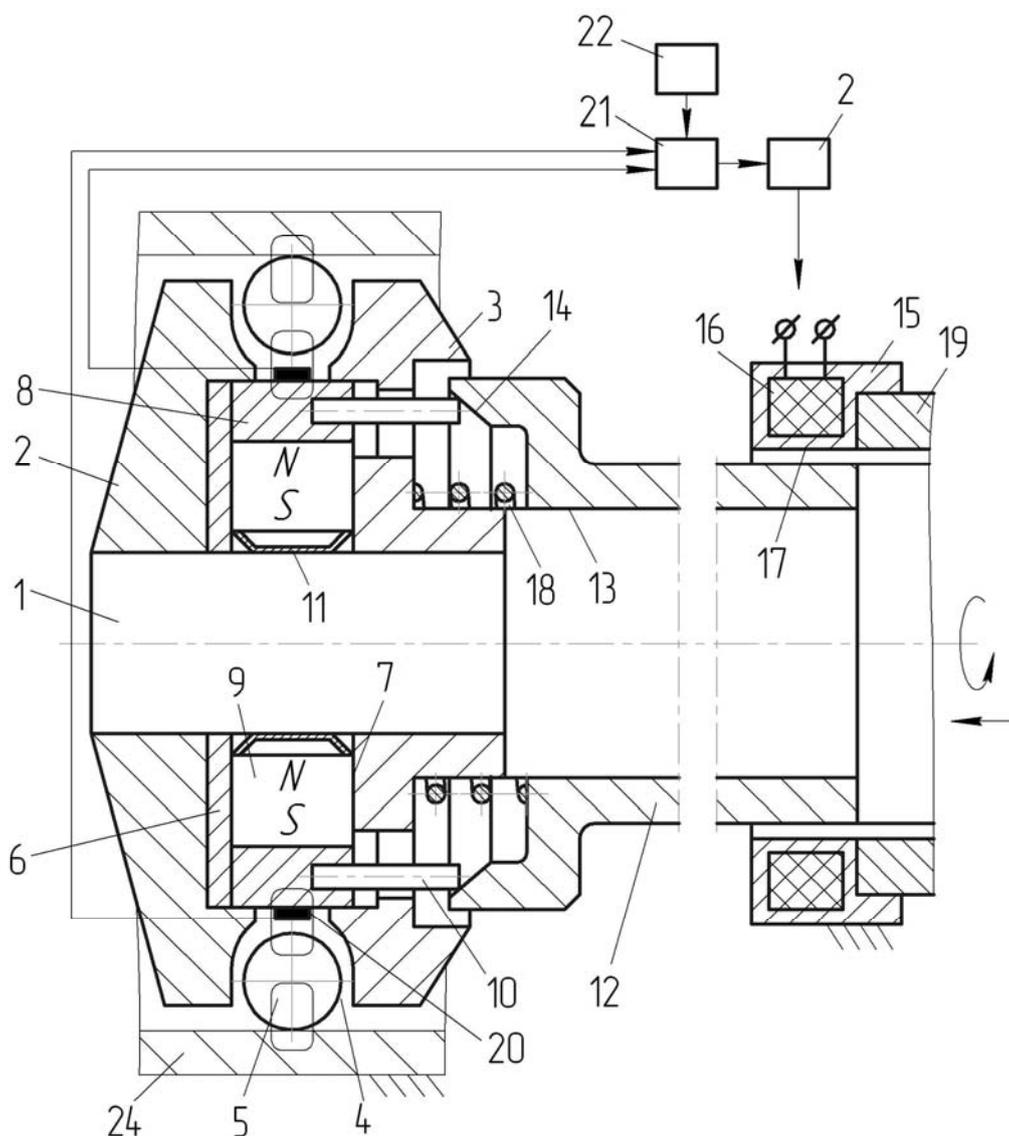


Рис. 1. Схема реализации системы адаптивного управления характеристиками упрочнения внутренней поверхности втулок при совмещенном магнитно-вибродинамическом накатывании

Управляющий электромагнит 15 отверстием 17 охватывает наружную поверхность стакана 12. Оправку 1 закрепляют в шпинделе, а управляющий электромагнит 15 – на корпусе 19 станка.

Система адаптивного управления станка включает индуктивные датчики 20 для измерения амплитуды колебаний деформирующих шаров 5, блок сравнения 21, задающий блок 22, блок усиления 23.

Упрочняемую втулку 24 закрепляют неподвижно в технологическом

приспособлении станка. Датчики 20 закрепляют на наружной поверхности обоймы 6. Инструмент устанавливают соосно поверхности отверстия и вводят в зону обработки, совмещая плоскость вращения деформирующих шаров 5 с торцом втулки 24. На обмотки управляющего электромагнита 15 подают номинальное напряжение, при котором обеспечивается предварительное перемещение стакана 12 влево относительно чертежа. При этом конус 14 воздействует на штифты 10 и удаляет цилиндриче-

ские магнитопроводы 8 и постоянные магниты 9 от деформирующих шаров 5. В результате цилиндрические постоянные магниты 9 размещаются в радиальных отверстиях 7 обоймы 6 в нейтральном положении.

Оправке 1 инструмента сообщают вращение, а столу станка с втулкой 24 – относительное движение подачи. Под периодическим действием вращающегося магнитного поля от цилиндрических постоянных магнитов 9 деформирующие шары 5 перемещаются вдоль кольцевой камеры 4, осуществляют радиальные колебательные движения, совершая импульсно-ударное деформирование внутренней поверхности втулки 24. При периодическом контакте деформирующих шаров 5 с втулкой 24 вращающееся магнитное поле от цилиндрических постоянных магнитов 9 одновременно воздействует на упрочняемую поверхность, обеспечивая совмещенную упрочняющую обработку магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

В процессе совмещенной упрочняющей обработки датчики 20 непрерывно измеряют амплитуду колебаний деформирующих шаров 5, взаимодействующих с поверхностью втулки 24. Измеренное значение амплитуды колебаний, преобразованное в электрический сигнал, поступает в блок сравнения 21 системы адаптивного управления станка. Одновременно в блок сравнения 21 подается эталонный сигнал от задающего блока 22. Сигнал рассогласования со своим знаком усиливается блоком 23 и подается на исполнительный механизм – управляющий электромагнит 15.

В соответствии со знаком и величиной сигнала рассогласования возникающая в электромагните 15 осевая сила перемещает в нужном направлении стакан 12 с конусом 14. Соответственно, конус 14, воздействуя на штифты 10, приближает или удаляет (в зависимости

от знака сигнала рассогласования) цилиндрические постоянные магниты 9 от деформирующих шаров 5. При этом изменяется величина действующего на последние вращающегося магнитного поля, уменьшая (или увеличивая) амплитуду колебаний деформирующих шаров 5, взаимодействующих с упрочняемой поверхностью. Регулируемое изменение величины вращающегося магнитного поля прекращается при приближении сигнала рассогласования сколь угодно близко к нулю.

Такая система адаптивного управления качеством обработки позволяет обеспечить стабильность осуществления процесса импульсно-ударного деформирования поверхности и уменьшить поле рассеивания значений характеристик упрочнения внутренней поверхности втулки 24 [7].

На рис. 2 изображена схема реализации системы адаптивного управления точностью обработки применительно к процессу совмещенного упрочнения вращающимся магнитным полем и динамическим магнитно-центробежным накатыванием.

Процесс совмещенной упрочняющей обработки осуществляют управляемым инструментом, позволяющим регулировать величину магнитного воздействия на поверхность ферромагнитной детали и деформирующие шары, осуществляющие динамическое упрочнение.

Управляемый инструмент содержит корпус 1, обойму 2 с аксиально расположенными с равномерным угловым шагом отверстиями 3, цилиндрические постоянные магниты 4, ступицы 5, 6 с осевыми отверстиями 7, 8, кольцевую камеру 9, деформирующие шары 10, магнитопроводы 11, 12, имеющие форму стаканов, штангу 13, штифты 14, 15, гильзу 16, пружину 17, фиксатор 18, управляющий электромагнит 19.

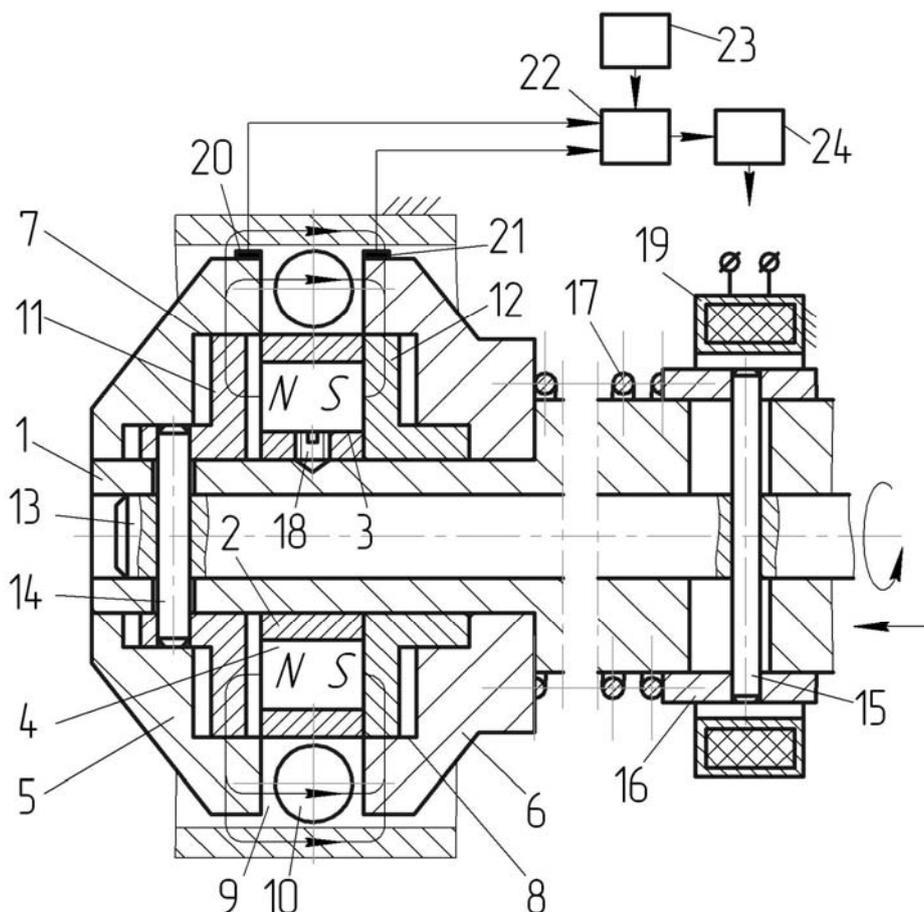


Рис. 2. Схема реализации системы адаптивного управления точностью обработки отверстия заготовок при совмещенном динамическом магнитно-центробежном накатывании

Штанга 13 установлена с возможностью перемещения в осевом отверстии 20 корпуса 1 и с помощью штифтов 14, 15 жестко соединена соответственно с магнитопроводом 11 и подвижной гильзой 16. Магнитопроводы 11, 12 установлены в отверстиях 7, 8 ступиц 5, 6. Магнитопровод 11 имеет возможность регулировочного осевого перемещения относительно обоймы 2. Управляющий электромагнит 19 отверстием охватывает гильзу 16.

Станок снабжен системой адаптивного управления, которая включает индуктивные датчики 21 для бесконтактного измерения диаметрального размера отверстия детали, сравнивающее 22 и задающее 23 устройства, блок усиления 24 и управляющий электромагнит 19.

Упрочняемую ферромагнитную втулку 25 закрепляют в приспособлении, а корпус 1 инструмента – в шпинделе станка. Инструмент устанавливают соосно втулке 25. Деформирующие шары 10 вводят в полость обрабатываемого отверстия. На обмотки управляющего электромагнита 19 подают номинальное напряжение. При этом возникающая магнитная сила перемещает гильзу 16 в осевом направлении. Гильза 16 посредством штифтов 14, 15 смещает штангу 13 и магнитопровод 11. Между магнитопроводом 11 и цилиндрическими постоянными магнитами 4 обоймы 2 образуется зазор. Силовые линии магнитного поля от цилиндрических постоянных магнитов 4 через указанный зазор, магнитопроводы 11, 12, ступицы 5, 6 одновременно замыкаются на деформирующие

шары 10 и упрочняемую поверхность отверстия ферромагнитной втулки 25.

Инструменту сообщают вращение и перемещают с подачей вдоль упрочняемой поверхности. Под действием вращающегося магнитного поля, создаваемого цилиндрическими постоянными магнитами 4, деформирующие шары 10 перемещаются вдоль кольцевой камеры 9 инструмента. Возникающая при этом центробежная сила прижимает их к упрочняемой поверхности детали 25. В результате деформирующие шары 10 инструмента осуществляют поверхностное пластическое деформирование и изменяют исходный диаметральный размер отверстия втулки 25 (в пределах удвоенного значения исходной шероховатости поверхности по параметру Rz).

Индуктивные датчики 21 измеряют получаемый диаметральный размер отверстия втулки 25. Измеренное значение диаметрального размера, преобразованное в электрический сигнал, поступает в сравнивающее устройство 22, где сравнивается с сигналом от задающего устройства 23. Сигнал рассогласования усиливается блоком усиления 24 и поступает на исполнительное устройство – управляющий электромагнит 19. В соответствии с величиной и знаком сигнала рассогласования управляющий электромагнит перемещает гильзу 16 инструмента в осевом направлении, тем самым устанавливая необходимую величину зазора между магнитопроводом 11 и цилиндрическими постоянными магнитами 4. Это приводит к изменению величины вращающегося магнитного поля, действующего на поверхность ферромагнитной детали 25 и деформирующие шары 10, и скорости перемещения деформирующих шаров 10 вдоль кольцевой камеры 9. Соответственно, изменяются величина центробежной силы, прижимающей деформирующие шары 10 к упрочняемой поверхности, и степень деформации исходных микронеровностей поверхности, определяющих диаметральный размер втулки 25. При

приближении сигнала рассогласования сколь угодно близко к нулю регулирующее воздействие управляющего электромагнита 19 прекращается.

Применение указанной системы адаптивного управления точностью позволяет существенно уменьшить поле рассеивания диаметрального размера отверстий обрабатываемой партии заготовок [8, 9].

Особенностью разработанной системы адаптивного управления точностью обработки (см. рис. 2) является то, что она позволяет изменять (регулировать) диаметральный размер отверстий обрабатываемых заготовок в пределах удвоенного значения высоты их исходной шероховатости, что весьма актуально при изготовлении прецизионных деталей машин с допуском на размер в несколько десятков микрометров.

Для повышения точности обработки заготовок, имеющих существенное колебание исходного диаметрального размера отверстий, предназначена интеллектуальная система адаптивного управления, позволяющая (в зависимости от величины исходной погрешности) выбирать методы и режимы механической обработки (рис. 3).

Управляемый комбинированный инструмент содержит оправку 1, обойму 2 с аксиально расположенными отверстиями 3, цилиндрические постоянные магниты 4, диски 5, 6, кольцевую камеру 7, деформирующие шары 8, тонкостенный упругий стакан 9, цилиндрическую ступицу 10, пружину 11.

На наружной поверхности 12 тонкостенного упругого стакана закреплен абразивный слой 13 (например, напылением, шаржированием абразивных зерен, закреплением абразива с помощью клея или механического крепления шлифовальной шкурки и т. д.), характеристики которого выбирают в соответствии с материалом и твердостью обрабатываемых заготовок. Цилиндрическая ступица 10 надета на оправку 1 и имеет возможность управляемого осевого перемещения. Тон-

костенный упругий стакан 9 жестко соединен с цилиндрической ступицей 10 и установлен соосно оправке 1. Внутренний диаметр 14 тонкостенного упругого стакана 9 превышает наружный диаметр дисков 5, 6. Оправка 1, обойма 2 и тонкостенный

упругий стакан 9 изготовлены из немагнитных материалов, что исключает рассеивание магнитного поля от цилиндрических постоянных магнитов 4 [10].

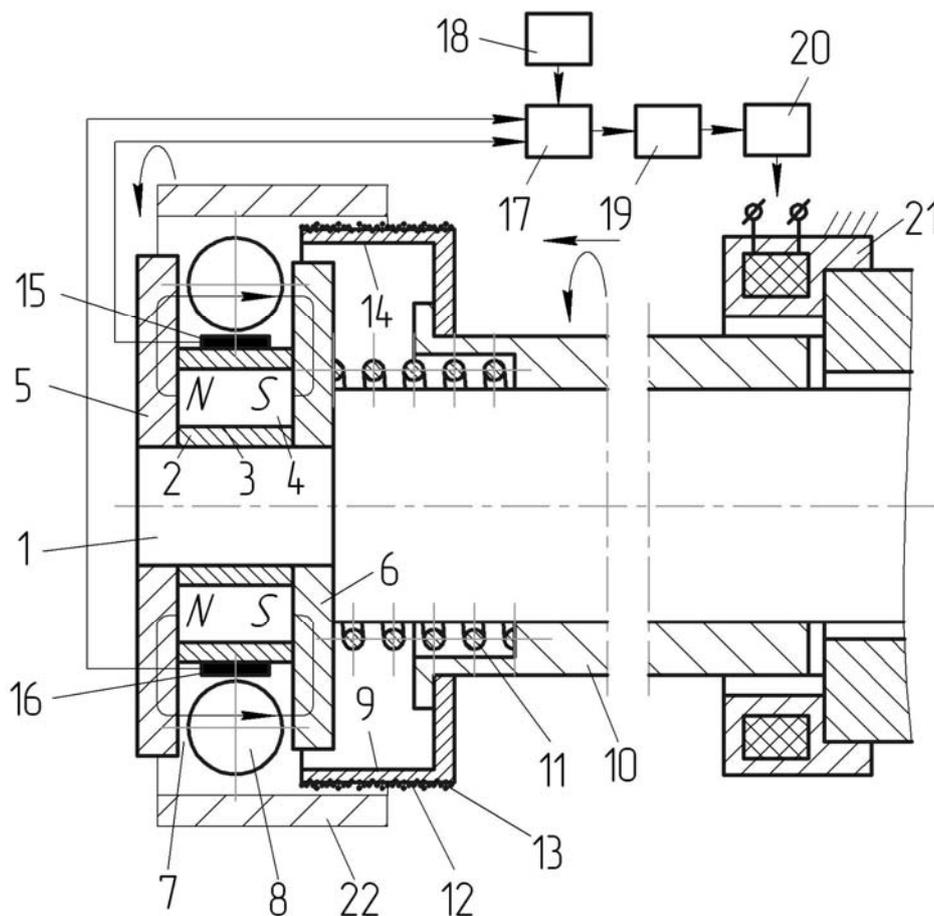


Рис. 3. Схема осуществления интеллектуальной системы управления точностью при комбинированной обработке отверстия втулок абразивным резанием и магнитно-динамическим накатыванием

В состав интеллектуальной системы адаптивного управления точностью входят индуктивные датчики 15, 16, сравнивающее устройство 17, задающий блок 18, блок усиления 19, программируемый контроллер 20, исполнительное устройство в виде электромагнита 21.

Деталь 22 закрепляют в патроне, а оправку 1 – в шпинделе станка. Продольную ось оправки 1 совмещают с осью детали 22. Ступица 10 находится в крайнем правом положении, что обес-

печивает работу инструмента первоначально в режиме упрочнения. Деформирующие шары 8 вводят в полость отверстия детали 22. Процессор 20 сообщает оправке 1 вращение с минимальной скоростью, обеспечивающей расхождение деформирующих шаров 8 в радиальном направлении и их взаимодействие с исходной поверхностью детали 22. При этом индуктивные датчики 15, 16 осуществляют измерение исходного диаметрального размера детали 22,

определяя расстояние от наружной поверхности обоймы 2 до вращающихся деформирующих шаров 8. Измеренное значение диаметрального размера детали 22, преобразованное в электрический сигнал, поступает в устройство 17, где сравнивается с сигналом, поступающим от задающего блока 18. Сигнал рассогласования усиливается блоком усиления 19 и подается на программируемый контроллер 20.

Программируемый контроллер 20 (в зависимости от величины поступающего сигнала рассогласования) выбирает один из методов механической обработки – магнитно-динамическое накатывание или обработку резанием (абразивную обработку).

Предположим, что исходный диаметральный размер отверстия детали 22 имеет минимальное допустимое значение. Тогда для увеличения диаметра отверстия детали 22 контроллер 20 останавливает вращение шпинделя станка и подает напряжение на электромагнит 21, который сжимает пружину 11 и перемещает ступицу 10 в крайнее левое положение (относительно чертежа). При этом тонкостенный упругий стакан 9 охватывает диски 5, 6, и его периферийная поверхность 12 с абразивным слоем 13 располагается напротив кольцевой камеры 7 с деформирующими шарами 8, образуя с обрабатываемой поверхностью зазор величиной $0,1 \dots 0,5$ мм.

Затем контроллер 20 подает команды на сообщение вращений детали 22 и оправке 1, а также на перемещение инструмента с подачей на оптимальных режимах. Деформирующие шары 8 вращающимся магнитным полем перемещаются вдоль кольцевой камеры 7 инструмента. Возникающая при этом центробежная сила прижимает деформирующие шары 8 к внутренней поверхности 14 тонкостенного стакана 9. Под действием центробежной силы тонкостенный упругий стакан 9 увеличивает свои радиальные размеры, уменьшая до нуля имеющийся зазор

между абразивным слоем 13 и обрабатываемой поверхностью детали 22. Вследствие этого абразивный слой 13 инструмента срезает с поверхности детали 22 определенный слой металла (припуск), повышая её размерную и геометрическую точность.

При получении требуемой величины диаметрального размера отверстия индуктивные датчики 15, 16 посылают сигнал на окончание процесса абразивной обработки. Контроллер 20 останавливает рабочие движения детали 22 и инструмента, отключает напряжение, подаваемое на обмотку электромагнита 21. Пружина 11 возвращает ступицу 10 в крайнее правое положение. Подается команда на упрочнение обработанной абразивным резанием поверхности детали 22 магнитно-динамическим накатыванием. Оправку 1 и деталь 22 вращают, а инструмент перемещают с подачей вдоль упрочняемой поверхности. Под действием вращающегося магнитного поля деформирующие шары 8 вращаются вокруг продольной оси инструмента, прижимаются центробежной силой к упрочняемой поверхности и осуществляют ее интенсивное поверхностное пластическое деформирование [10].

Таким образом, разработанная интеллектуальная система адаптивного управления точностью сама выбирает методы механической обработки отверстия заготовки (резанием или поверхностным пластическим деформированием) и определяет последовательность их выполнения, обеспечивая высокие качественные и точностные параметры обработки.

Заключение

В работе представлена система адаптивного управления характеристиками упрочнения поверхностного слоя детали при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и магнитно-вибродинамическим упрочнением. Для стабилизации характеристик упрочнения поверхности в процессе

совмещенной обработки предложено поддерживать постоянную по величине амплитуду колебаний деформирующих шаров инструмента, взаимодействующих с деталью.

Описана система адаптивного управления точностью получения диаметального размера при совмещенном динамическом магнитно-центробежном накатывании поверхности отверстия заготовок, в которой поправку в размер динамической настройки инструмента производят путем изменения скорости вращения деформирующих шаров. В качестве регулируемого параметра технологической системы выбирают величину вращающегося магнитного поля, действующего на упрочняемую поверхность

и деформирующие шары инструмента.

Приведены сведения об интеллектуальной системе адаптивного управления точностью при совмещенной обработке резанием и магнитно-динамическим накатыванием, которая в зависимости от исходной точности диаметального размера отверстия заготовки сама выбирает инструмент для механической обработки.

Рассмотрены конструкции управляемых инструментов для совмещенной магнитно-вибродинамической упрочняющей обработки, позволяющие регулировать величину вращающегося магнитного поля, действующего на элементы технологической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. 2068770 РФ, МКИ⁶ В 24 В 39/02 / А. М. Довгалев (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалев (РБ). – № 4922542/27 ; заявл. 29.03.91 ; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 6 с.
2. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. 2089373 РФ, МКИ⁶ В 24 В 39/02 / А. М. Довгалев (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалев (РБ). – № 4924841/02 ; заявл. 05.04.91 ; опубл. 10.09.97, Бюл. № 25. – 6 с.
3. **Балакшин, Б. С.** Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1969. – 559 с.
4. Адаптивное управление станками / Под ред. Б. С. Балакшина. – М. : Машиностроение, 1973. – 688 с.
5. **Жигалов, А. Н.** Адаптивное управление при совмещенной обработке резанием и ППД / А. Н. Жигалов. – Могилев : МГУП, 2013. – 236 с.
6. **Жасимов, М. М.** Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании / М. М. Жасимов. – Алма-Ата : Наука, 1986. – 208 с.
7. Способ управления поверхностным пластическим деформированием и устройство для его осуществления : пат. 2068763 РФ, МКИ⁶ В 24 В 39/00 / А. М. Довгалев (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалев (РБ). – № 4679342 ; заявл. 18.04.89 ; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 4 с.
8. Способ поверхностного пластического деформирования поверхности вращения и инструмент для его осуществления : пат. 2052331 РФ, МКИ⁶ В 24 В 39/02 / А. М. Довгалев (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалев (РБ). – № 4854644/08 ; заявл. 27.07.90 ; опубл. 20.01.96, Бюл. № 2. – 6 с.
9. Инструмент для поверхностного пластического деформирования : пат. 1815190 РФ, МКИ В 24 В 39/02 / А. М. Довгалев (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалев (РБ). – № 4732328/27 ; заявл. 28.08.89 ; опубл. 15.05.93, Бюл. № 18. – 4 с.
10. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали : пат. 19415 РБ, МПК В 24 В 39/02 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, С. А. Сухоцкий ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, С. А. Сухоцкий (РБ). – № а 201200545 ; заявл. 04.04.12 ; опубл. 30.08.15, Бюл. № 3. – 4 с.

Статья сдана в редакцию 26 февраля 2016 года

Александр Михайлович Довгалев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: ret@bru.by.

Aleksandr Mikhailovich Dovgalev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: ret@bru.by.