

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ УПРУГОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА

В. П. Кузнецов



КУЗНЕЦОВ
Виктор Павлович

Кандидат технических наук, доцент. Заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов Курганского государственного университета. Специалист в области автоматизации производства трубопроводной арматуры и нефтегазопромыслового оборудования, нелинейной динамики технологических систем и синтеза инструмента для отделочной обработки поверхностей деталей на станках с ЧПУ. Член научно-методической комиссии Учебно-методического объединения в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) Минобрнауки РФ. Автор более 70 работ, в том числе четырех книг и более 15 изобретений.

Введение

В высокотехнологичном машиностроении все чаще применяются многооперационные станки с ЧПУ, позволяющие обрабатывать за один установ сложные детали. При реализации многоцелевой обработки деталей с ответственными поверхностями (с шероховатостью

$R_a \leq 0,1$ мкм) основной проблемой является инструментальное обеспечение финишных отделочных переходов.

Одним из высокопроизводительных процессов отделочной обработки деталей на станках с ЧПУ может быть упругое выглаживание. Выглаживание деталей на многоцелевом станке позволяет исключить трудоемкие и малопродуктивные процессы притирки и доводки. Однако в настоящее время отсутствуют теория и методы расчета выглаживающего инструмента для виброустойчивой отделочной обработки деталей с достижением шероховатости поверхностей в сотые доли микрометра. Задача параметрического синтеза выглаживающего инструмента для отделочной обработки поверхностей деталей является достаточно сложной по следующим причинам:

1) математическая модель динамики упругого выглаживания является существенно нелинейной [1];

2) в нелинейно-динамической системе возможно возникновение автоколебательных процессов или существование нескольких устойчивых состояний при изменении параметров элементов и внешних воздействий [2];

3) допустимые значения параметров нелинейных динамических систем с достаточно высокой точностью можно выявить только с помощью специально разработанных методов имитационного моделирования на ЭВМ.

Данная работа посвящена созданию методи-

19

где $y_{\max}$ – максимальная величина внедрения индентора в поверхность в такте виброперемещений; $k_2 = h_b/y$ – коэффициент высоты валика; k_1 – поправочный коэффициент формы отпечатка контакта; НВ – твердость поверхности детали по Бринеллю [1].

Широкий спектр влияния параметров инструмента (массы m_1 , коэффициентов жесткости C_1 и вязкого трения B_1 упругодемпфирующего элемента и силы сухого трения $F_{\text{тр}}$) на виброустойчивость процесса упругого выглаживания можно исследовать имитационным моделированием нелинейно-динамического процесса методом фазового портрета. Многолистный фазовый портрет обеспечивает наиболее точное представление динамических процессов с параметрами, имеющими разрывный ($F_{\text{тр}}$) и гистерезисный (C_0) характер [3].

Фазовый портрет динамики упругого выглаживания и методика имитационного моделирования допустимых параметров инструмента

Многолистный фазовый портрет процесса упругого выглаживания строится в координатах $y - dy/dt$ на основе численного решения дифференциальных уравнений (1)–(4) и зависимостей (5), (6) адаптивным методом Рунге – Кутты. Фазовые траектории портрета изображают виброперемещение y рабочей части индентора. Точкам разрыва нелинейных зависимостей соответствуют линии переключения, в которых фазовые траектории переходят на следующий лист фазового портрета (рис. 3).

Лист 1 фазового портрета описывает вход

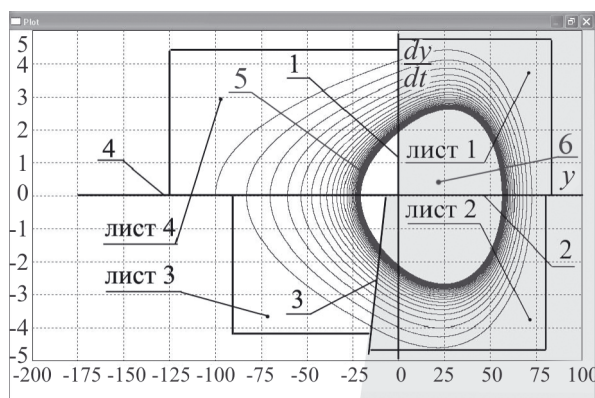


Рис. 3. Структура многолистного фазового портрета модели нелинейно-динамического процесса упругого выглаживания

индентора инструмента в обрабатываемую поверхность и ограничен двумя линиями переключения. Линия переключения 1 соответствует моменту касания индентором поверхности (граница «воздух–металл») и переключению в модели решения от дифференциального уравнения (4) к уравнению (1). Линия переключения 2 характеризует изменение знака виброскорости индентора и переключение в модели решения от дифференциального уравнения (1) к уравнению (2). Лист 2 фазового портрета описывает выход индентора инструмента из обрабатываемой поверхности и ограничен линиями переключения 2 и 3. Линия 3 характеризует момент выхода индентора из контакта с поверхностью в точке с координатой $y_{i\max} = -h_{ei\max}$ и переключение решения от уравнения (2) к уравнению (3). Лист 3 фазового портрета описывает движение индентора от поверхности. Линия переключения 4 показывает изменение знака виброскорости индентора и переключение решения от уравнения (3) к уравнению (4). Лист 4 соответствует движению индентора инструмента к обрабатываемой поверхности и ограничен линиями переключения первого и третьего листов. Движение изображающей точки фазовой траектории завершается на особой линии 5, которая представляет аттрактор «устойчивый предельный цикл» [4]. Построение фазовых траекторий в области 6, ограниченной линией 5, выполняется в отдельном цикле вычислений с присвоением виброперемещению y и виброскорости dy/dt индентора значений, принадлежащих к данной области 6. По виду особых точек и линий (аттракторов) многолистный фазовый портрет позволяет определить условия перехода от автоколебательного к виброустойчивому состоянию индентора инструмента при упругом выглаживании.

Имитационная модель нелинейной динамики процесса упругого выглаживания реализована в программном пакете VisSim 5 [5]. Блоки структурной схемы (рис. 4) взаимодействуют между собой через функциональные связи в соответствии с физической природой процессов. Решение разрывных и гистерезисных зависимостей реализовано с использованием стандартных переключающих блоков «MERGE». Моделирование процесса формирования валика высотой h_b деформируемого материала выполнено на основе блока симуляции устройства выборки и хранения

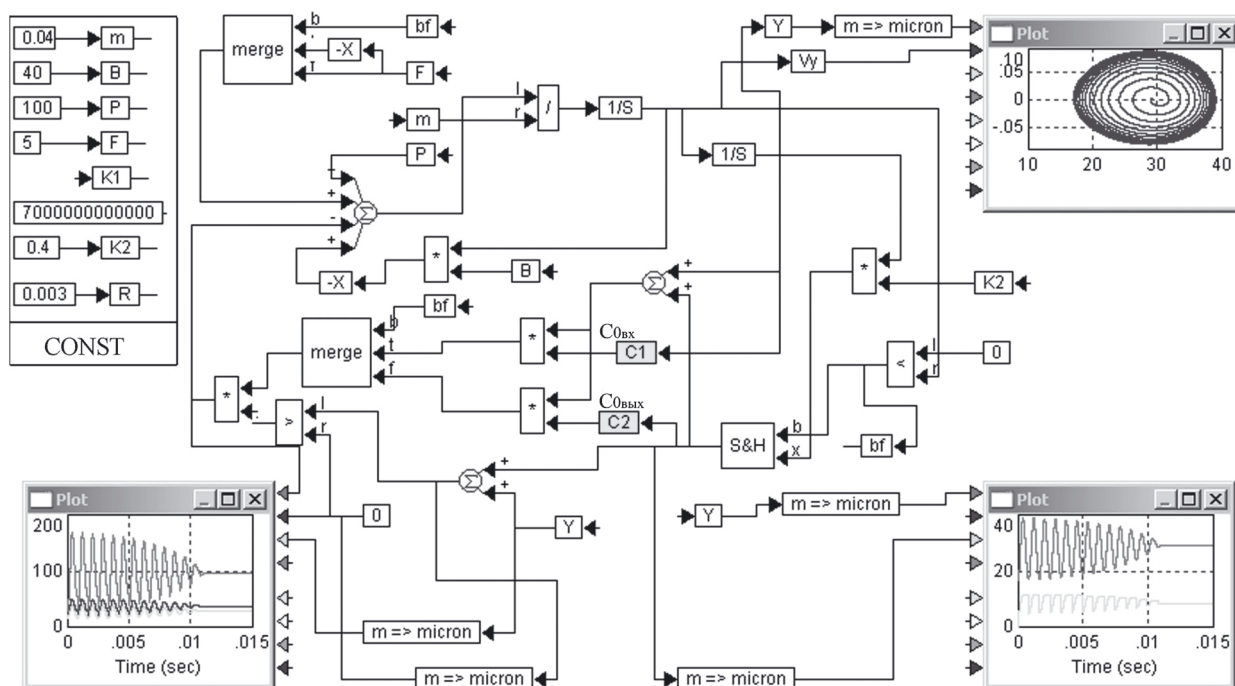


Рис. 4. Структурная схема имитационной модели нелинейной динамики процесса упругого выглаживания в программном пакете VisSim 5

«S&H». Составные блоки C_1 и C_2 вычисляют, $C_{\text{овх}}$ и $C_{\text{овых}}$ соответственно.

Численные значения параметров инструмента, постоянных коэффициентов и силы выглаживания (m , B , R , $F_{\text{тр}}$, k_1 , k_2 , P) вводят через стандартные блоки «CONST». Графическое отображение динамических процессов в виде многолистного фазового портрета и переходных характеристик реализовано блоком графопостроителя «PLOT».

Для определения допустимых значений параметров инструмента на основе компьютерной имитационной модели нелинейной динамики упругого выглаживания поверхностей деталей разработана методика, которая включает следующие этапы:

1) установление областей виброустойчивости нелинейно-динамической системы упругого выглаживания в виде предельных циклов и аттракторов многолистного фазового портрета для каждого из моделируемых параметров инструмента последовательным проведением вычислительных экспериментов;

2) определение допустимых границ изменения параметров инструмента, при которых на фазовом портрете траекторий виброперемещений индентора из всех установленных особых линий и точек остается аттрактор типа «устойчивый фокус»;

3) определение точных значений параметров инструмента в установленных границах по критерию минимального времени переходного процесса виброперемещения индентора путем продолжения моделирующих вычислительных экспериментов.

Имитационное моделирование допустимых параметров инструмента-прототипа

Методика определения параметров инструмента на основе имитационного моделирования нелинейной динамики процесса реализована применительно к упругому выглаживанию поверхности детали из нержавеющей стали 20X13 инструментом-прототипом английской фирмы COGSDILL TOOL PRODUCTS (рис. 5) на токарно-фрезерном центре MULTUS B-300W фирмы OKUMA.

Моделирование проводилось при следующих начальных значениях параметров: масса индентора $m=40$ г; коэффициент вязкого трения $B_1=40$ (Н·с)/м; сила сухого трения $F_{\text{тр}}=5$ Н; радиус заточки рабочей части индентора $R=3$ мм; сила выглаживания $P=100$ Н. Контактная жесткость взаимодействия индентора с поверхностью детали в зависимостях (5) и (6)

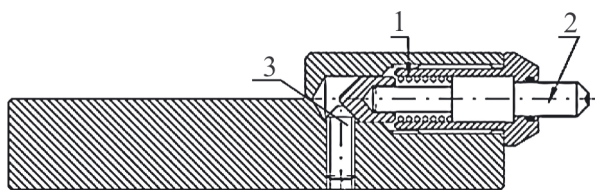


Рис. 5. Схема инструмента фирмы COGSDILL TOOL PRODUCTS: 1 – пружина сжатия; 2 – индентор с алмазным сферическим наконечником; 3 – регулировочный винт

описана с учетом эмпирического коэффициента $k_1 = 7 \cdot 10^{12}$ Н/м³. Величина коэффициента k_1 соответствует твердости поверхности детали HB=180, а коэффициент $k_2 = 0,4$ [1].

Для указанных параметров имитационной модели был получен фазовый портрет нелинейной динамики упругого выглаживания инструментом-прототипом (рис. 6).

Линии 1 и 3 представляют аттракторы фазо-

вого портрета, характеризующие, соответственно, автоколебательное и устойчивое состояния процесса. Линия 2 – особая линия перехода к затухающим колебаниям индентора. Стрелки 4 и 5 показывают направление фазовых траекторий к автоколебательному аттрактору, стрелка 6 – к устойчивому аттрактору 3.

Результаты имитационного моделирования определения границ изменения массы индентора по условию виброустойчивости упругого выглаживания представлены на рис. 7. Уменьшение массы индентора инструмента-прототипа от 40 г до 17,2 г вызывает слияние неустойчивого и устойчивого предельных циклов (линии 1 и 2 на рис. 6). Этот процесс приводит к образованию фазового пятна в виде области 1 с увеличенной плотностью фазовых траекторий (см. рис. 7, а). Такой конфигурации фазовых траекторий соответствуют колебания индентора с большой длительностью затухания.

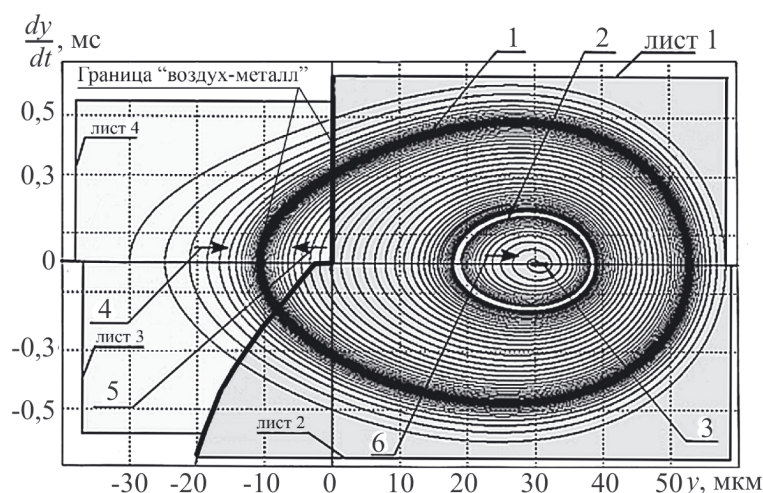


Рис. 6. Фазовый портрет нелинейной динамики упругого выглаживания инструментом-прототипом фирмы COGSDILL TOOL PRODUCTS

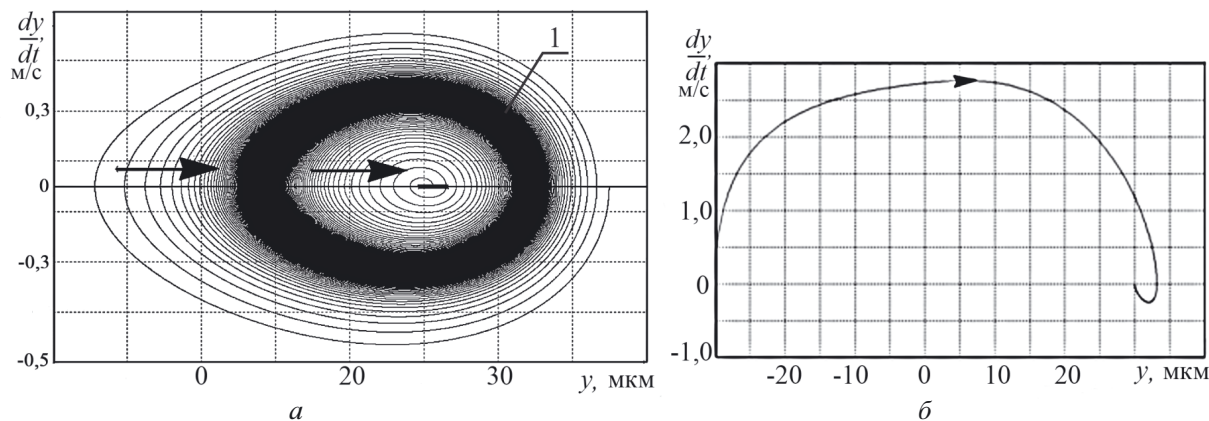


Рис. 7. Фазовый портрет (а) и фазовая траектория (б) виброперемещения индентора инструмента с массой, соответственно, $m=17,2$ г (а) и $m=0,2$ г (б)

При пороговом значении массы $m_{кр}=17,2$ г нелинейно-динамический процесс становится виброустойчивым.

Дальнейшее уменьшение массы вызывает возрастание резонансной частоты колебаний индентора и сокращение длительности переходных процессов. Массе индентора $m=0,2$ г соответствует переход колебательного процесса в аperiodический (см. рис. 7, б). Эта граница определяет критическое затухание и минимальное время переходного процесса в динамической системе. Таким образом, по результатам моделирования установлено, что для выглаживающего инструмента масса индентора должна быть в пределах $m=(0,2-17,2)$ г.

В динамическом процессе упругого выглаживания диссипативными силами в упругодемпфирующем элементе индентора инструмента являются силы сухого $F_{тр}$ и вязкого $B \cdot dy/dt$ трения. Величина силы $F_{тр}$ определяет размер аттрактора 3 на фазовом портрете (см. рис. 6). Область фазового портрета, прилегающая к аттрактору 3, в увеличенном масштабе представлена на рис. 8 в виде сходящихся к аттрактору 1 фазовых траекторий.

Длина L особой линии 1 соответствует зоне застоя индентора от действия разрывной зависимости силы сухого трения $F_{тр}$ в упругодемпфирующем элементе инструмента:

$$L = y_{\max} - y_{\min} = \frac{2F_{тр}}{C_0}; \quad (7)$$

$$y_{\min} = \frac{P - F_{тр}}{C_0}; \quad y_{\max} = \frac{P + F_{тр}}{C_0}.$$

Имитационное моделирование показало, что при финишной обработке прецизионных деталей применение в конструкции инструмен-

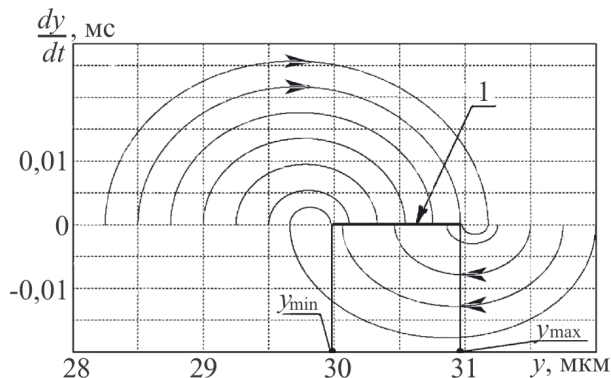


Рис. 8. Фазовые траектории виброперемещений индентора при моделировании силы сухого трения $F_{тр}$

та упругодемпфирующего элемента с сухим трением недопустимо по причине образования зоны застоя L и, следовательно, непериодической волнистости на поверхности детали. При уменьшении сухого трения до уровня $F_{тр}=0$ устойчивый процесс выглаживания превращается в неустойчивый. Снижение устойчивости нелинейно-динамического процесса обусловлено слиянием устойчивого фокуса с неустойчивым предельным циклом и образованием неустойчивого фокуса 2 (рис. 9, а). Данному фазовому портрету соответствует переходный процесс на рис. 9, б, в котором можно выделить два характерных участка (3 и 4). На участке 3 амплитуда колебаний практически не меняется, хотя нелинейно-динамическая система уже потеряла устойчивость.

На участке 4 происходит скачкообразный рост амплитуды колебаний до максимального значения, определяемого устойчивым предельным циклом 1 (см. рис. 9, а). В теории нелинейной динамики систем [3] такой процесс относят к опасным бифуркационным явлениям. Скачкообразный переход из устойчивого состояния

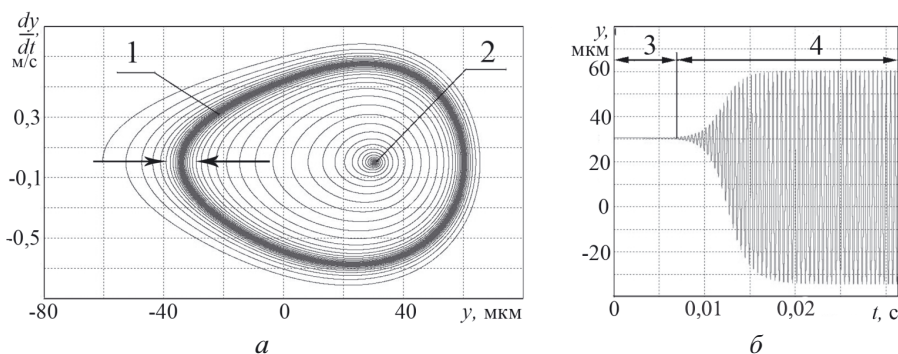


Рис. 9. Фазовый портрет (а) и переходный процесс (б) неустойчивой динамической системы упругого выглаживания при $F_{тр}=0$: 1 – устойчивый предельный цикл; 2 – неустойчивый фокус; 3 – неустойчивое состояние индентора с малой амплитудой колебаний; 4 – автоколебания индентора

в автоколебательный режим с максимальной амплитудой возможен в момент незначительного изменения любого параметра процесса выглаживания инструментом фирмы COGSDILL TOOL PRODUCTS и при любом малом значении силы $F_{тр}$. Такой опасный переходный процесс (жесткое возбуждение автоколебаний) приводит к браку детали на финишной операции или поломке дорогостоящего алмазного индентора инструмента.

Имитационное моделирование упругого выглаживания при $F_{тр}=0$ позволило определить границу устойчивости процесса, соответствующую пороговому значению коэффициента вязкого трения B_1 в упругодемпфирующем элементе. Моделирование изменения коэффициента вязкого трения B_1 в широких пределах позволило установить, что при значении $B_1=89$ (Н·с)/м происходит слияние устойчивого предельного цикла с неустойчивым фокусом и образование фазового пятна 1 (рис. 10, а).

Таким образом, величина коэффициента вязкого трения $B_1=89$ (Н·с)/м определяет границу устойчивости динамической системы упругого

выглаживания при $F_{тр}=0$ и других неизменных параметров модели. Установлено, что для данного значения параметра динамической системы время затухания колебаний индентора стремится к бесконечности (рис. 10, б). В результате имитационного моделирования определено, что границу аperiодического переходного процесса определяет значение коэффициента вязкого демпфирования $B_1=350$ (Н·с)/м (рис. 11), которое соответствует критическому затуханию.

Установленное значение коэффициента B_1 , соответствующее затухающему процессу колебаний индентора, позволяет обеспечить снижение шероховатости выглаживаемой поверхности.

Выглаживающий инструмент с новыми конструкциями упругодемпфирующих элементов

Согласно выявленным выше обстоятельствам высокопроизводительное упругое выглаживание исследуемым инструментом при скорости $v \geq 100$ м/мин, подаче $S \geq 0,2$ мм/об и силе $P=100$ Н динамически нестабильно и может переходить из устойчивого состояния в автоко-

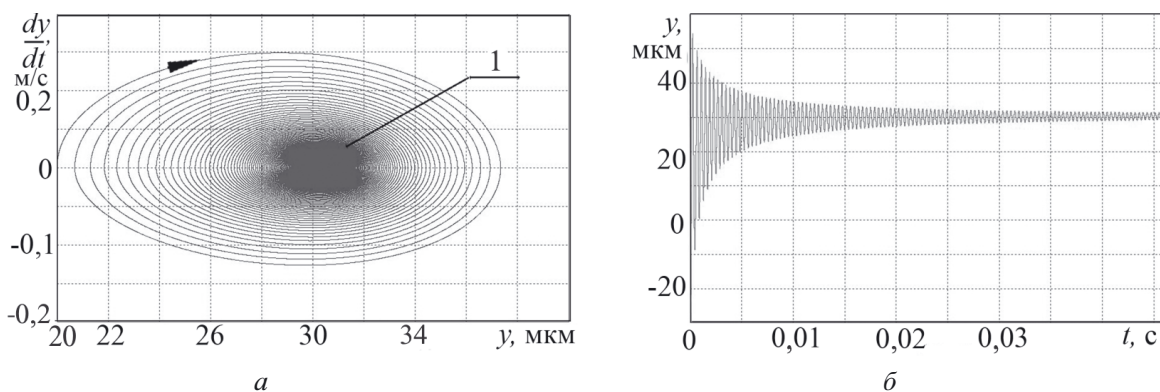


Рис. 10. Фазовый портрет (а) и переходный процесс (б) колебаний индентора при $F_{тр}=0$, $B_1=89$ (Н·с)/м

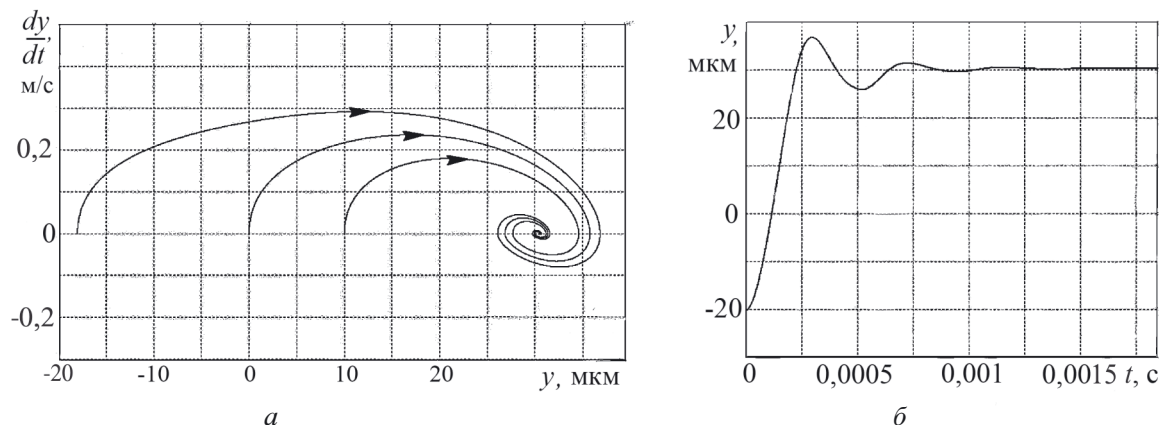


Рис. 11. Фазовый портрет нелинейной динамики процесса выглаживания (а) и переходный процесс (б) колебаний индентора при $F_{тр}=0$, $B_1=350$ (Н·с)/м

лебательное. Имитационное моделирование нелинейной динамики упругого выглаживания поверхностей деталей инструментом-прототипом позволило установить следующее:

1) значение массы индентора $m=40$ г приводит к существенной колебательности нелинейно-динамической системы;

2) конструкция упругодемпфирующего элемента исследуемого инструмента принципиально не позволяет увеличить эквивалентный коэффициент вязкого трения B_1 до установленных в ходе эксперимента границ (200–400 (Н·с)/м), соответствующих динамической стабилизации процесса;

3) конструктивное исполнение направляющих индентора не позволяет исключить влияние силы сухого трения для уменьшения непериодической волнистости в микрорельефе выглаженной поверхности.

На основе анализа результатов моделирования нелинейной динамики упругого выглаживания поверхностей деталей разработан ряд новых конструкций упругодемпфирующих элементов и на их базе создана серия быстросменного инструмента для виброустойчивой отделочной обработки деталей на станках с ЧПУ и токарно-

фрезерных центрах. Конструкции упругодемпфирующих элементов выглаживающего инструмента (рис. 12) по виду диссипативных свойств были разделены на три типа.

1. Конструкции со стальными пружинными элементами и демпфированием за счет вязкого и сухого трения (см. рис. 12, а). В этом случае для регулирования демпфирующих свойств используется демпфер сухого трения с регулируемым усилием поджатия F .

2. Конструкции с резиновыми элементами, выполненными на основе синтетического карбоксилатного или бутадиен-нитрильного каучука, обеспечивающих демпфирование за счет деформации сжатия (см. рис. 12, б) или коаксиального сдвига (см. рис. 12, в).

3. Конструкции с комбинированным исполнением из элементов первого и второго типа.

Предложенные упругодемпфирующие элементы позволяют минимизировать силу сухого трения $F_{тр}$ в направляющих индентора, а масса m_1 и коэффициент вязкого трения B_1 соответствуют установленным при имитационном моделировании условиям виброустойчивости и критического затухания колебаний индентора. Выглаживатели с новыми конструкциями

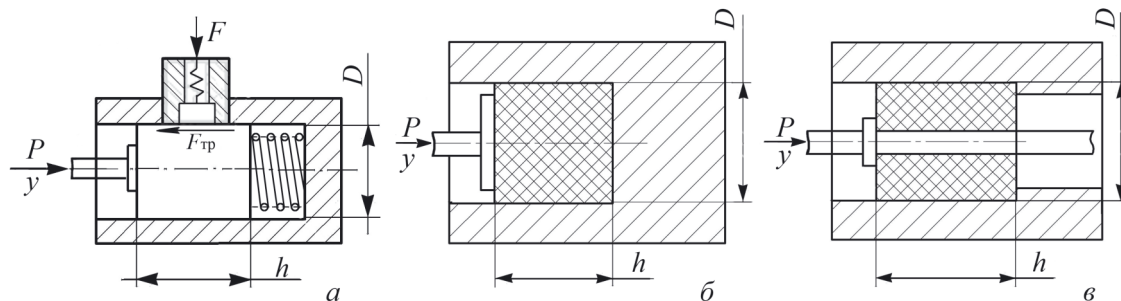


Рис. 12. Варианты упругодемпфирующих элементов инструмента: а – с регулируемым трением; б – с резиновыми упругими втулками сжатия; в – с элементами, работающими на коаксиальный сдвиг; D и h – диаметр и длина демпфирующего элемента

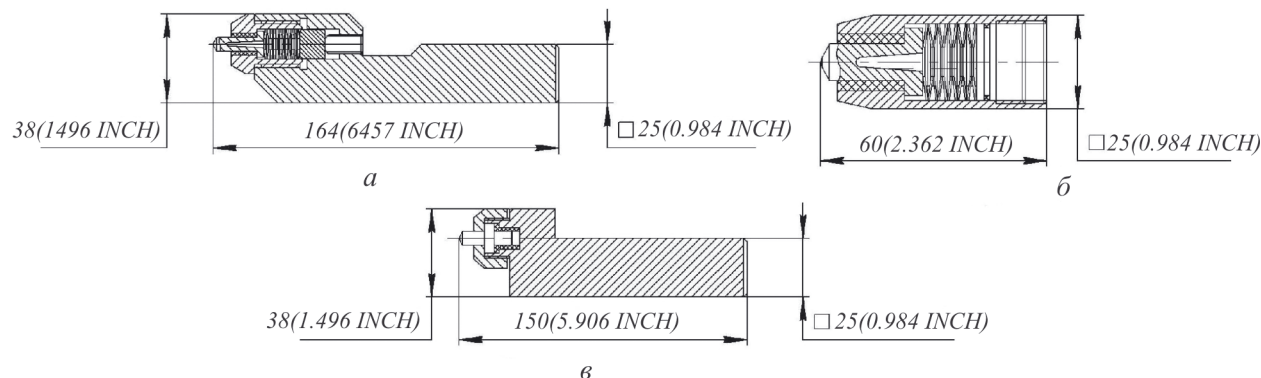


Рис. 13. Выглаживающий инструмент для отделочной обработки деталей на станках с ЧПУ: а – патент РФ на полезную модель № 70178; б – патент РФ на полезную модель № 62554; в – патент РФ на полезную модель № 74095

ми упругодемпфирующих элементов (рис. 13) имеют стандартные установочные размеры для резцедержателей и инструментальных оправок станков с ЧПУ.

Разработанный быстросменный инструмент внедрен на ряде предприятий по производству арматуры. Его применение на токарно-фрезерных центрах позволило за один установ обрабатывать сложную и ответственную деталь «шпиндель» шибберных и клиновых задвижек нефтегазопромыслового оборудования [6]. При этом гарантированно обеспечивается уровень шероховатости уплотнительной поверхности шпинделя $R_a \leq 0,1$ мкм.

Заключение

В ходе исследований была создана методика определения параметров инструмента для высокопроизводительного упругого выравнивания деталей на станках с ЧПУ с достижением шероховатости поверхностей $R_a \leq 0,1$ мкм. В ее основе лежит имитационное моделирование нелинейной динамики технологической системы по критериям виброустойчивости упругого выравнивания и минимального времени переходного процесса виброперемещения индентора инструмента. В соответствии с моментом установления на многолистном фазовом портрете аттрактора типа «устойчивый фокус» при моделировании определяются границы допустимого изменения параметров инструмента по критерию виброустойчивости процесса. Окончательно величины параметров инструмента устанавливаются по достижению переходным процессом виброперемещения индентора критического затухания.

Применение разработанной методики к моделированию высокопроизводительного упругого выравнивания деталей из нержавеющей стали 20Х13 инструментом-прототипом фирмы COGSDILL TOOL PRODUCTS на токарно-фрезерном центре MULTUS B-300W (OKUMA) позволило выявить пути совершенствования конструкции упругодемпфирующих элементов и создать новый инструмент для отделочной обработки поверхностей.

Список литературы

1. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г. Математическое моделирование нелинейной динамики процесса упругого выравнивания поверхностей деталей // Вестник машиностроения. 2008. № 12. С. 61–65.
2. Методы синтеза нелинейных систем автоматического управления / Под ред. С.М. Федорова. – М.: Машиностроение, 1970. – 416 с.
3. Фейгин М.И. Вынужденные колебания систем с разрывными нелинейностями. – М.: Наука, 1994. – 288 с.
4. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981. – 568 с.
5. Дьяконов В. VisSim+Mathcad+MATLAB: Визуальное математическое моделирование. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 384 с.
6. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Дмитриева О.В. Быстросменный инструмент для отделочного выравнивания уплотнительных поверхностей шпинделей задвижек при многоцелевой обработке на токарно-фрезерном центре // Материалы и технологии XXI века: Сб. стат. VII Междунар. науч.-техн. конференции. – Пенза: Приволжск. дом знаний, 2009. С. 65–67.