

**А. И. Бохонский**, д-р техн. наук, проф., **Е. С. Елькина**, аспирант  
Севастопольский государственный университет, Россия  
*E-mail: [bohon.alex@mail.ru](mailto:bohon.alex@mail.ru)*

## УПРАВЛЯЕМОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЗАГОТОВОК ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

*Найдены управления в виде опорных моментов деформированием нежесткой заготовки с дискретным изменением изгибной жесткости. Устранение перемещения и угла поворота сечения заготовки с координатой приложения силы резания обеспечивает локальную квазижесткость заготовки, что снижает погрешности формы и размеров в процессе автоматической токарной обработки.*

**Ключевые слова:** нежесткие заготовки, токарная обработка, погрешность обработки, управление деформированием, опорные моменты.

**A. I. Bokhonsky, E. S. Ielkina**

### THE CONTROLLED DEFORMATION OF BLANK PARTS BY THE AUTOMATIC TURNING

*The controls constituting the moments of a support by non-rigid billet deformation with discrete rigidity of flexural changes were found. The clearing of a drift and the angle of rotation of the workpiece with the point a provides the local quasihard of workpiece that provides error decreasing of form during automatic turning.*

**Key words:** non-rigid workpieces, turning, error handling, control deformation, moments of a support.

#### 1. Введение

В работах [1-5] не только предложены, разработаны, теоретически и экспериментально исследованы модели оптимального управления упругим деформированием нежестких заготовок при токарной обработке (при медленном перемещении силы резания вдоль заготовки), но и даны новые технические решения механических исполнительных органов систем автоматического управления деформированием заготовок. Например, в [3] рассмотрен пример экспериментальной реализации силового воздействия на заготовку в виде опорных моментов, изготовлены и апробированы исполнительные органы, реализующие управление данного типа.

Для синтеза оптимальных силовых управлений деформированием заготовок переменного сечения по длине в [2-4] использовался, например, вариационный метод Ритца, строго обосновывалась зависимость между погрешностью формы заготовки в виде бочкообразности и ее упругими перемещениями в процессе обработки. В работе [5] обращено внимание на необходимость разделения управлений: медленным перемещениям нежесткой заготовки (в связи с изменениями положения силы резания при ее движении вдоль заготовки) и сложными колебаниями, обусловленными процессом резания.

И до настоящего времени задачи моделирования поведения широкого класса нежестких заготовок при управлении их деформированием продолжают оставаться актуальными как с точки зрения снижения погрешности изготавливаемых деталей, так и как задачи прикладной механики деформируемого твердого тела – оптимального управления деформированием объектов при динамической подвижной нагрузке.

*Целью данной статьи* является совершенствование модели управляемого деформирования нежесткой заготовки с дискретным изменением изгибной жесткости при использовании управлений в виде опорных моментов.

## 2. Основное содержание и результаты работы

В качестве управляющих воздействий (Рисунок 1) использовались опорные моменты  $M_1$  и  $M_2$ . Необходимо найти такие управления  $M_1(a)$  и  $M_2(a)$ , при которых перемещение  $W(a)$  и угол поворот сечения  $W'(a)$  от силы резания и опорных моментов с координатой  $a$  равны нулю ( $W(a) = 0, W'(a) = 0$ ).

Для вычисления перемещения по направлению радиальной составляющей силы резания использовался принцип суперпозиции (независимости действия сил) для линейной системы и интеграл Мора:

$$f_c = \sum_{i=1}^3 \int_S \frac{\bar{M}_1 M_p dS}{EI}, \quad (1)$$

где  $\bar{M}_1$  – величина изгибающего момента от единичной силы (либо единичного момента) на каждом из трех участков;  $M_p$  – изгибающий момент на каждом из участков от силы резания  $P_r$  и опорных моментов;  $EI$  – изгибающая жесткость заготовки ( $EI_1$  и  $EI_2$ ).

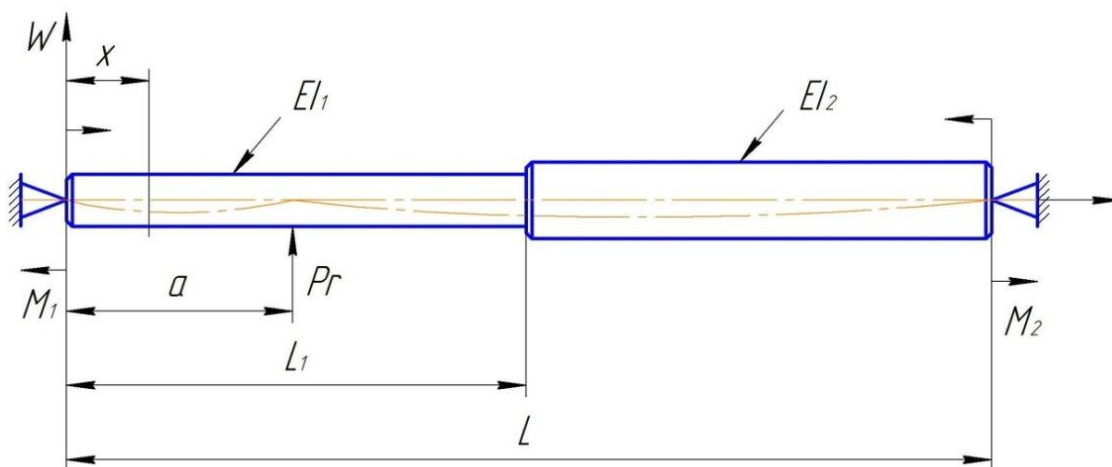


Рис.1. – Схема нежесткой заготовки

При движении силы резания на участке выражения для опорных моментов  $L_1 \geq x \geq 0$ , обеспечивающие  $W(a) = 0, W'(a) = 0$ , принимают вид:

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{1}{3} \frac{(\text{Pr} \cdot a(-3L^2na + 2L^3n - 9aL^2 + 12La^2 + 2L^3 - 4a^3))}{L(-aLn + L^2n - 3La + 2a^2 + L^2)}, \\ M_2 &= \frac{1}{6} \frac{((7L^3 + L^3n - 24aL^2 + 24La^2 - 8a^3) \text{Pr} a)}{L(-aLn + L^2n - 3La + 2a^2 + L^2)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L$  – общая длина заготовки;  $a$  – координата силы резания;  $n = \frac{EI_1}{EI_2}$ ;  $L_1 = L/2$ .

При движении силы резания на следующем участке  $L > x > L_1$  выражения для управлений записываются следующим образом:

$$M_1 = \frac{1}{6} \frac{\text{Pr}(-L^4 + nL^4 + aL^3 - nL^3a - 8nLa^3 + 8na^4)}{La(-L - 2an + Ln)},$$

$$M_2 = -\frac{1}{3} \frac{(-L^4 + nL^4 - 4nL^3a + 4aL^3 + 3nL^2a^2 - 3L^2a^2 + 4nLa^3 - 4na^4)\text{Pr}}{La(-L - 2an + Ln)}. \quad (3)$$

Совмещенные графики изменения управлений при последовательном движении на участках с разными жесткостями (при:  $L = 1\text{ м}$ ;  $\text{Pr} = 100\text{ Н}$ ;  $n = 0,25$ ) изображены на рисунках 2, 3. На этих рисунках также показаны графики опорных моментов при постоянной изгибной жесткости. Если  $EI_1 = EI_2 = EI$ , т. е.

$$M_1 = M_2 = \frac{2\text{Pr}(L-a) \cdot a}{3L}. \quad (4)$$

Выражение (4) для опорных моментов постоянной жесткости заготовок, которое получено из (2) и (3), подтверждает достоверность полученных управлений деформированием заготовки с дискретным изменением жесткости. Как следует из графиков, характер управлений деформирования заготовок изменяется в зависимости от соотношения изгибных жесткостей участков.

С использованием найденных управляющих воздействий совершенствуется модель и структурная схема системы автоматического управления деформированием заготовок, включающая управление по медленному движению (в связи с изменением положения силы резания при ее движении вдоль заготовки) и управление по быстрому движению (управление колебаниями, которые порождаются подвижным динамическим воздействием).

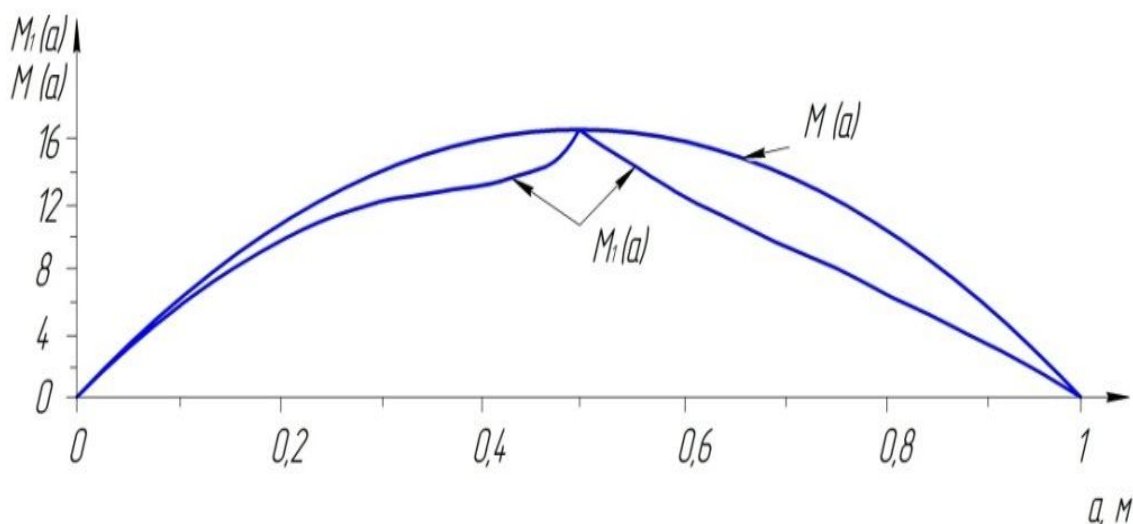


Рис.2.— Графики опорных моментов  $M(a)$  и  $M_1(a)$

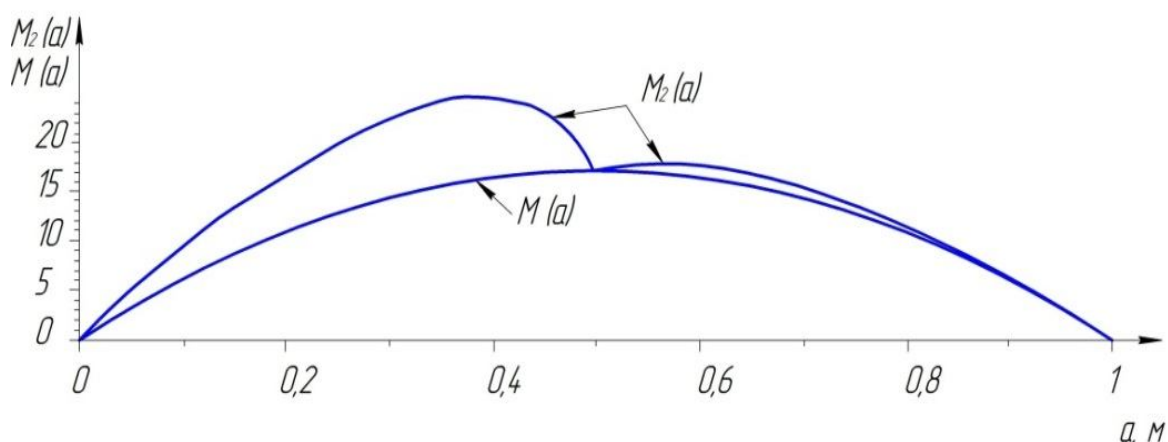


Рис.3. – Графики опорных моментов  $M(a)$  и  $M_2(a)$

### 3. Заключение

Возможны два типа реализации оптимальных управлений: использование специально разработанных устройств [3] для реализации опорного изгибающего момента, оснащенного гасителями изгибных и крутильных колебаний; применение для подавления колебаний ПД – регулятора (в отрицательной обратной связи), который снижает уровень колебаний среднего сечения заготовки, обеспечивая таким образом уменьшение колебаний сечения заготовки, в котором приложена сила резания.

Снижение упругих перемещений, обусловленных изгибными деформациями нежестких заготовок в процессе автоматической токарной обработки, и колебаний заготовки обеспечивает повышение точности изготовления деталей данного класса и чистоту их поверхности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бохонский А. И., Рыжкова Н. П. Управление линейными и угловыми упругими деформациями заготовок при токарной обработке // Станки и инструменты. 1985. – № 4. – С. 28–29.
2. Бохонский А. И., Вохмянин А. И. Повышение точности токарной обработки нежестких заготовок // Станки и инструмент. 1994. – № 9. – С. 27–31.
3. Бохонский А. И., Вохмянин А. Н. Управление деформированием нежестких деталей при токарной обработке: Монография. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1999. – 240 с.
4. Бохонский А. И., Шмидт Л. А. Вариационные методы поиска управлений деформированием нежестких заготовок при токарной обработке // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – № 20. – С. 56–60.
5. Бохонский А. И., Варминская Н. И. Вариационное и реверсионное исчисление в механике: монография. Под ред. А. И. Бохонского. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.

Поступила в редколлегию 07.12.2015 г.