

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ НЕЖЕСТКОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Бохонский А.И., Чалая Е.С.

Черноморское высшее военно-морское орденов Нахимова и Красной звезды училище им. П.С. Нахимова, Севастополь

Ключевые слова: токарная обработка, нежесткая заготовка, компенсация упругих перемещений, погрешность форм, упругое деформирование, энергоёмкость.

Аннотация. Для нежесткой заготовки, закрепленной в патроне и в центре, уточнена модель поиска компенсирующего (управляющего) воздействия, обеспечивающего отсутствие упругих перемещений по направлению силы резания при токарной обработке заготовки. Построены графики: упругого перемещения заготовки, обусловленные ее изгибными деформациями, и зависимости компенсирующего воздействия от координаты силы резания. Для уменьшения погрешности форм и размеров детали при токарной обработке использовалось компенсирующее (или управляющее) локальное воздействие в виде сосредоточенной силы, которое находится из условия равенства нулю перемещения нежесткой заготовки по направлению радиальной составляющей силы резания, обусловленного упругими изгибными деформациями заготовки в процессе обработки. В данной статье приводятся уточнения модели компенсации с более строгим учетом деформируемого состояния заготовки.

MODEL CONTROL IMPROVEMENT OF THE DEFORMATION OF A FLEXIBLE BLANK DURING TURNING

Bokhonsky A.I., Chalaya E.S.

Black Sea Higher Naval Order of Nakhimov and the Red Star School named after P.S. Nakhimov, Sevastopol

Keywords: turning, non-rigid workpiece, compensation of elastic displacements, shape error, elastic deformation, energy consumption.

Abstract. It has been refined the model of compensating (controlling) influence search that provides the absence of elastic movements in the direction of the cutting force during turning for a non-rigid workpiece fixed in the chuck and in the center. Graphs are constructed: the elastic displacement of the workpiece, due to its bending deformations, and the dependence of the compensating effect on the coordinate of the cutting force. To reduce the error in the shape and size of the part during turning, a compensating (or controlling) local action in the form of a concentrated force was used, which is found from the condition that the movement of a non-rigid workpiece in the direction of the radial component of the cutting force is equal to zero, due to elastic bending deformations of the workpiece during processing. In this article it is provides refinements of the compensation model with more strict consideration of the deformable state of the workpiece.

Введение

В работах [1-4] приведены результаты исследований оптимального управления упругим деформированием нежестких заготовок при медленно движущейся силе резания в процессе автоматической токарной обработки.

В [2] разработаны модели управляемого деформирования нежестких заготовок при автоматической токарной обработке. По существу в механике деформируемого твердого тела появился новый класс задач оптимального управления при медленно движущейся нагрузке. В [5] не только усовершенствованы модели компенсации упругих перемещений, но и приводятся результаты экспериментальных исследований при использовании компенсирующего воздействия.

Даже весьма простые модели оптимизации упругих перемещений нуждаются в совершенствовании при переходе к практическому использованию. В данной статье

приводятся уточнения модели компенсации с более строгим учетом деформируемого состояния заготовки.

Цель исследований – определение компенсирующего воздействия для снижения упругих перемещений нежесткой заготовки, закрепленной в патроне и центре при автоматической токарной обработке.

Для описания деформируемого состояния один раз статически неопределимой заготовки применены статические условия равновесия и метод начальных параметров.

Определение компенсирующего (управляющего) воздействия

Компенсация упругих перемещений по направлению радиальной составляющей силы резания в сечении, где эта силы приложена, является частным случаем непрерывного управления.

Схема обрабатываемого нежесткого вала изображена на рисунке 1.

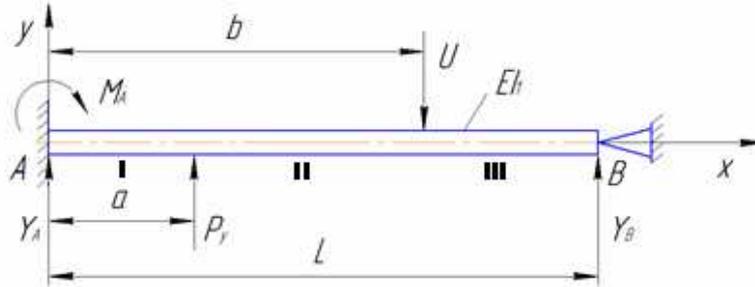


Рис. 1. Схема вала (P_y – радиальная составляющая силы резания, U – компенсирующее воздействие)

Для описания деформируемого состояния один раз статически неопределимой заготовки использованы условия статического равновесия и условие равенства нулю перемещения опоры B:

$$\sum_{k=1}^n M_A = Y_B \cdot L - Ub - P_y a - M_0 = 0; \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^n M_B = -M_0 - P_y(L - a) + U(L - b) - Y_A \cdot L = 0;$$

$$W(L) = \frac{M_0 \cdot L^2}{2} + \frac{Y_A \cdot L^3}{6} + \frac{P_y(L - a)^2}{6} - \frac{U(L - b)^3}{6} = 0,$$

где Y_A, Y_B, M_0 – реакции патрона и центра; L – длина заготовки; a – координата силы резания; b – координата компенсирующего воздействия.

Система уравнений (1) решена с использованием функции solve (в Maple):

$$M_0 = \frac{-Ub^3 - 3P_yLa^2 + P_ya^3 + 3ULb^2 - 2UL^2b + 2P_yL^2a}{2L^2};$$

$$Y_A = -\frac{1}{2} \frac{(-Ub^2 - 3P_yLa^2 + P_ya^3 + 3ULb^2 + 2P_yL^2 + 2UL^2)}{L^3}; \quad (2)$$

$$Y_B = -\frac{1}{2} \frac{(Ub^3 - 3P_yLa^2 + P_ya^3 + P_ya^3 - 3ULb^2)}{L^3}.$$

Для выражений (2) выполняется условие равенства суммы проекций всех сил на ось:

$$\sum_{k=1}^n P_{ky} = 0, \quad Y_A + Y_B - P_y - U = 0. \quad (3)$$

При движении силы P_y на участке $0 \leq x \leq b$ компенсирующее воздействие находится из условия равенства нулю перемещения:

$$\frac{1}{EI} \left(\frac{M_0 a^2}{2} + \frac{Y_A a^3}{6} \right) = 0. \quad (4)$$

С учетом M_0 и Y_A из уравнения (4) следует выражение для компенсирующего воздействия:

$$U = -\frac{P_y a(-9L^2 a + 6La^2 + 4L^3 - a^3)}{-3Lb^3 + 9L^2 b^2 - 6L^3 b - 3aLb^2 + ab^3 + 2aL^3}. \quad (5)$$

На участке 1 функция прогиба заготовки имеет вид:

$$W_1(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{M_0 x^2}{2} + \frac{Yax^3}{6} \right). \quad (6)$$

На участке 2:

$$W_2(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{M_0 x^2}{2} + \frac{Yax^3}{6} + \frac{P_y(x-a)^3}{6} \right). \quad (7)$$

На участке 3:

$$W_3(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{M_0 x^2}{2} + \frac{Yax^3}{6} + \frac{P_y(x-a)^3}{6} - \frac{U(x-b)^3}{6} \right). \quad (8)$$

После подстановки Y_A, Y_B, U, M_0 в выражения для перемещений, они становятся весьма громоздкими и поэтому не приводятся.

График перемещения заготовки построен при следующих исходных данных: $L = 0,2\text{ м}$; $b = 0,5L$; $a = 0,4L$; $d = 0,01\text{ м}$; $P_y = 200\text{ Н}$; $E = 2 \cdot 10^{11}\text{ Па}$; $I = \frac{\pi d^4}{64}$.

На каждом участке заготовки своя функция прогиба. Поэтому при построении общего графика используется специальная функция Maple.

```
> f := plot(W1, x = 0, a): y := plot(W2, x = a..b): k := plot(W3, x = b..L):
> with(plots): display({f, y, k});
```

График прогиба заготовки изображен на рисунке 2.

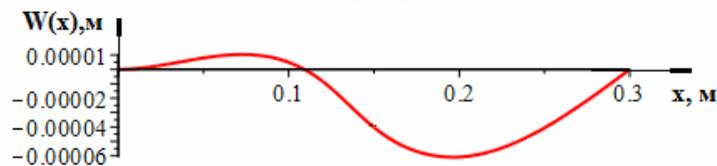


Рис. 2. График перемещения заготовки

График $U(a)$ построен с учетом изменения управления на каждом участке. Как и ранее, при построении графика $W(x)$, использована функция `with(plots):display({f, g})`. График компенсирующего воздействия изображен на рисунке 3.

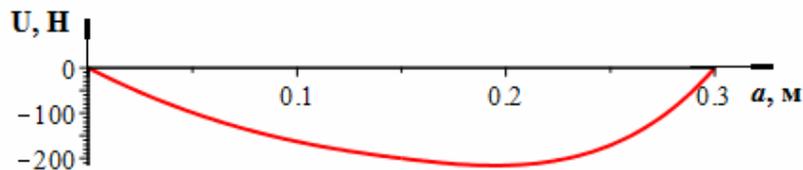


Рис. 3. График $U(a)$ – управляющего воздействия

2. Уточнение координаты приложения компенсирующего воздействия

Если обрабатываемая заготовка закреплена в центрах, то компенсирующее воздействие, в силу симметрии, должно быть приложено посередине заготовки. В случае закрепления в патроне и центре, координата приложения компенсирующего воздействия смещается в сторону меньшей жесткости, т.е. $b > (L/2)$.

После определения реакций (при $U=0$) с учетом $x=a$, выражение для перемещения по направлению силы P_y принимает вид:

$$W(a) = \frac{P_y}{12EI L^3} (-9L^2 a + 6La^2 + 4L^3 - a^3) a^3. \quad (9)$$

Максимальный прогиб получим из условия равенства нулю производной (угла поворота)

$$\frac{dW(a)}{da} = 0. \quad (10)$$

При $a=b$ после преобразований уравнение (10) принимает вид:

$$b^3 - 5Lb^2 + 6L^2b - 2L^3 = 0. \quad (11)$$

Один из корней нелинейного уравнения (11) соответствует физическому смыслу задачи:

$$b = (2 - \sqrt{2})L = 0,586L. \quad (12)$$

Таким образом, компенсирующее воздействие должно быть смещено на расстояние $b=0,586L$ от начала координат.

3. Устройство для реализации силового воздействия

На рисунке 4 изображен компенсатор. Силовое воздействие U обеспечивается сжатием пружины 8. Ролики 9, связанные с валом 1, представляют [4] собой подшипники качения, взаимодействующие с вращающейся деталью; создаваемое пружиной усилие ролики передают в направлении, противоположном радиальной составляющей силе резания P_y .

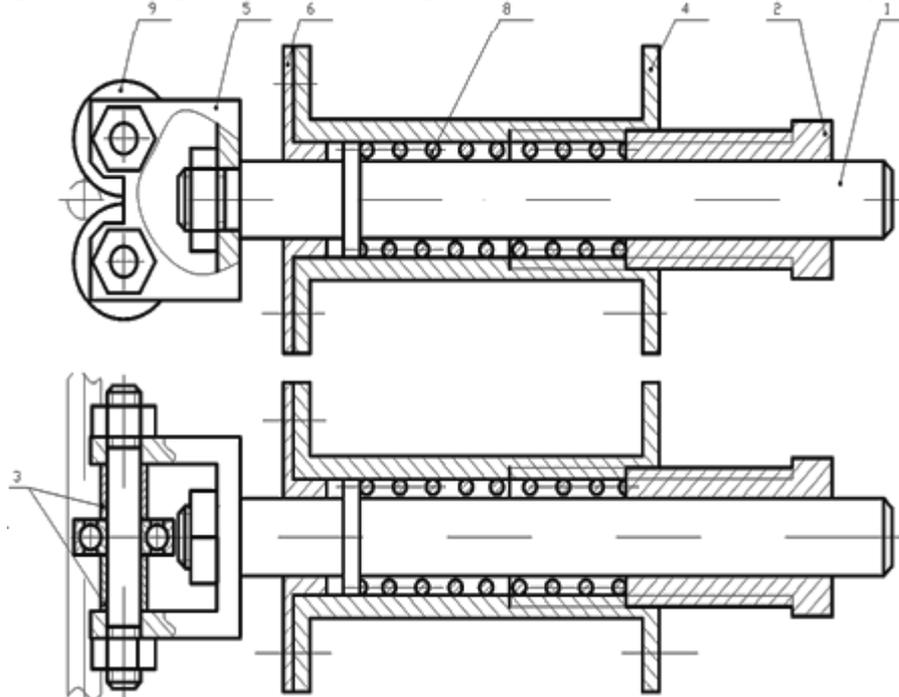


Рис. 4. Компенсатор: 1 – вал; 2 – втулка; 3 – втулка распорная; 4 – гильза; 5 – кронштейн; 6 – крышка; 7 – ось; 8 – пружина; 9 – ролики

Проектировочные расчеты приспособления предполагают определение параметров пружины, в частности удлинение пружины (осадка) равно:

$$\lambda = 8 \frac{P_u D_{cp}^3 n}{G d_{np}^4},$$

где n – число витков пружины; d_{np} – диаметр проволоки пружины; G – модуль упругости II рода, модуль сдвига; P_u – усилие, которое необходимо развивать в процессе компенсации; D_{cp} – средний диаметр витка пружины; λ – удлинение (или осадка пружины).

Коэффициент жесткости $c = G d_{np}^4 / 8 D_{cp} n$.

Заключение

Уточнена модель компенсации упругих перемещений нежесткой заготовки при ее закреплении в патроне и центре. Построены графики перемещений и управлений при

движении силы резания вдоль заготовки. Найденное программное управление позволяет повысить точность воспроизведения управляющего воздействия в системе автоматического управления деформациями нежестких заготовок (САУ ДНЗ) и таким образом снизить погрешности обработки.

Список литературы

1. Бохонский А.И. Компенсация перемещений и управление деформированным состоянием твердых тел и систем // тез. докл. VII Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. – М., 1991. – С. 60-61.
2. Бохонский А.И., Вохмянин А.Н. Управление деформированием нежестких деталей при токарной обработке: Монография. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1999. – 240 с.
3. Бохонский А.И., Шмидт Л.А. Компенсация перемещений и управление деформированием заготовок при токарной обработке. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – 109 с.
4. Бохонский, А.И., Чалая Е.С., Шмидт Л.А. Компенсация перемещений, закрепленных в патроне и центре нежестких заготовок при токарной обработке // Вестник современных технологий. – 2017. – №6. – С. 16-20.
5. Адаптивное управление станками / Под ред. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973. – 687 с.
6. Братан С.М., Левченко Е.А., Покинтелица Н.И., Харченко А.О. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 228 с.
7. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832с.
8. Подпоркин В.Г. Обработка нежестких деталей. – М., Л.: Машгиз, 1959. – 150 с.
9. Соколовский А.П. Расчет точности обработки на металлорежущих станках. – Л.: Машгиз, 1952. – 286с.
10. Козлов В.Н. Методическое пособие по дисциплине «Резание материалов и режущий инструмент». – Томск: ТПУ, 2014. – 131 с.
11. Корсаков В.С. Точность механической обработки. – М.: Машгиз, 1961. – 315 с.
12. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов. – Л.: Машиностроение, 1970. – 320 с.
13. Митрофанов В.Г., Ковальчук Е.Р., Косов М.Г. Основы автоматизации машиностроительного производства. – М.: Высш. шк., 1999. – 312 с.

References

1. Bokhonsky A.I. Displacement Compensation and Control of the Deformed State of Solids and Systems // Proc. report VII All-Union Congress on Theoretical and Applied Mechanics. – М., 1991. – P. 60-61.
2. Bokhonsky A.I., Vokhmyanin A.N. Deformation control of non-rigid parts during turning: Monograph. – Sevastopol: Publ. house of SevGTU, 1999. – 240 p.
3. Bokhonsky A.I., Schmidt L.A. Compensation of displacements and control of deformation of workpieces during turning. – Novokuznetsk: SRC MS, 2018. – 109 p.
4. Bokhonsky A.I., Chalaya E.S., Schmidt L.A. Compensation of movements fixed in the chuck and the center of non-rigid blanks during turning // Bulletin of modern technologies. 2017, no.6, pp. 16-20.
5. Adaptive management of machines / Ed. by B.S. Balakshin. – М.: Mechanical Engineering, 1973. – 687 p.
6. Bratan S.M., Levchenko E.A., Pokintelitsa N.I., Kharchenko A.O. Automatic control of mathematical processing processes: textbook. – М.: University textbook: INFRA-M, 2017. – 228 p.
7. Dorf R., Bishop R. Modern control systems / Tr. from Eng. B.I. Kopylov. – М.: Basic Knowledge Laboratory, 2002. – 832 p.
8. Podporkin V.G. Processing of non-rigid parts. – М., L.: Mashgiz, 1959. – 150 p.
9. Sokolovsky A.P. Calculation of processing accuracy on metal cutting machines. – L: Mashgiz, 1952. – 286 p.
10. Kozlov V.N. Methodological guide for the discipline "Cutting materials and cutting tools". – Tomsk: TPU, 2014. – 131 p.
11. Korsakov V.S. The accuracy of machining. – М.: Mashgiz. 1961. – 315 p.
12. Matalin A.A. The accuracy of machining and designing technological processes. – L.: Mechanical Engineering, 1970. – 320 p.
13. Mitrofanov V.G., Kovalchuk E.R., Kosov M.G. Fundamentals of automation of machine – building production. М.: Higher School, 1999. – 312 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Бохонский Александр Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры физики и общетехнических дисциплин	Bokhonsky Alexander Ivanovich – doctor of technical sciences, professor of the Department of physics and general technical disciplines
Чалая Елена Сергеевна – преподаватель кафедры физики и общетехнических дисциплин	Chalaya Elena Sergeevna – lecturer of the Department of physics and general technical disciplines
makarov_sibsiu@mail.ru	

Получена 26.05.2023