

УДК 621.9.015

**Жданов А.А., Плотников А.Л., Чигиринский Ю.Л., Фирсов И.В.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УТОЧНЕНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ
НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

Волгоградский государственный технический университет,

Россия, Волгоград, пр. им. В. И. Ленина, 28, 400005

Zhdanov A.A., Plotnikov A.L., Tchigirinsky Ju. L., Firsov I.V.

**THE MATHEMATICAL MODEL OF CORRECTIONS THE CUTTING
CONDITIONS TO PROVIDING THE PRECISION OF NONRIGID SHAFTS
TURNING ON CNC MACHINES**

Volgograd State Technical University,

28, Lenin's av., Volgograd, Russia, 400005

Аннотация. Предложен способ обеспечения точности токарной обработки нежестких валов за счет изменения режимов резания

Ключевые слова: сила резания, стрела прогиба вала, технологические свойства контактной пары, точность токарной обработки

Abstract. Describes a method for ensuring the accuracy of turning non-rigid shafts due to changes in the cutting conditions

Key words: an arrow of deflection of the shaft, cutting force, precision turning, the technological properties of the contact pair

Вступление.

При разработке технологического процесса с использованием станков с ЧПУ одной из задач технолога является максимальная концентрация технологических переходов и операций за один установ. Это способствует уменьшению вмешательства рабочего в цикл обработки, а также является более правильным, поскольку обработка большего числа поверхностей осуществляется от одних и тех же технологических баз. Однако при обработке

нежестких деталей такой подход затруднителен. Кроме того, даже с использованием специальных схем закрепления точность обработки обеспечивается не во всех случаях.

Обзор литературы.

Эти проблемы описаны многими авторами. Еще в 70-х годах прошлого века профессор Балакшин Б.С. предложил идею адаптивного управления механической обработки. Многие авторы идут по тому же пути. В. А. Лизогуб предлагает систему регулирования подачи (для компенсации действия прогиба заготовки под действием силы резания) в процессе обработки с использованием адаптивного управления. А. А. Кобзев и Л. К. Генералов используют параллельное моделирование процесса обработки с системой датчиков обратной связи для прогнозирования и корректировки режимов обработки, что призвано снизить погрешности, связанные с инерционностью систем управления. Следует также отметить работу В. В. Юркевича, разработавшего устройство, измеряющее пространственные изменения положения оси заготовки во время обработки для расчета текущих значений силы резания на основе выведенных закономерностей с помощью программного комплекса. Все эти разработки показывают хорошие результаты в рамках лаборатории. Однако есть некоторые трудности в их внедрении в условиях реального производства. Это связано с тем, что их использование требует существенной модернизации оборудования, установки системы датчиков, применения специального программного обеспечения, что является затруднительным. Кроме того, если получить надежную математическую модель для расчета силы резания P_y , позволяющую производить вычисления с приемлемой погрешностью в 5-10%, то необходимость использования адаптивного управления точностью отпадает сама собой.

Основной текст.

Для обеспечения заданной точности обработки без применения приспособлений типа люнетов необходима достоверная информация о величине прогиба заготовки u_c под действием радиальной составляющей силы

резания P_y , чтобы за счет изменения ее величины компенсировать прогиб заготовки в каждом конкретном сечении до значения, при котором будет выдерживаться заданный допуск формы:

$$y_c \leq [y]_i = k_i \cdot Td, \quad (1)$$

где $[y]_i$ – допускаемая величина прогиба заготовки, которая определяется, исходя из заданного уровня геометрической точности (А, В, С);

k_i – коэффициент, зависящий от принятого уровня геометрической точности, равный 0,3; 0,2; 0,12 для уровней А, В, С соответственно;

Td – допуск на размер.

Из формулы расчета максимального прогиба заготовки при различных схемах закрепления следует:

$$P_{y \max} \leq \frac{k_i \cdot Td \cdot k_3 \cdot E \cdot J}{L^3}, \quad (2)$$

где E – модуль нормальной упругости, кг/мм²;

J – момент инерции сечения заготовки в месте прогиба в мм⁴;

L – длина детали между двумя крайними точками закрепления;

k_3 – коэффициент, зависящий от схемы закрепления.

Все элементы формулы (2), находящиеся справа от знака неравенства вполне определены и являются геометрическими параметрами (J , L , Td) или механическими характеристиками (E). Ошибка в их величине маловероятна и может составлять 5-10%. Результатом расчета является значение силы резания P_y , которое обеспечит выполнение требований по точности формы.

С другой стороны, сила резания P_y определяется заданными режимами обработки, а также рядом эмпирических коэффициентов и поправок [1]:

$$P_{x,y,z} = C_{Px,y,z} \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_P, \quad (3)$$

где $C_{Px,y,z}$ – эмпирический поправочный коэффициент, учитывающий режущие свойства инструментального материала;

x , y , n – показатели степени;

t – глубина резания, мм;

S – подача, мм/об;

V – скорость резания, м/мин;

K_p – коэффициент, учитывающий геометрию режущего инструмента и механические свойства обрабатываемого материала.

Авторы некоторых табличных справочников [2] рекомендуют вычислять значение радиальной составляющей силы резания P_y по приближенной формуле, в процентах от величины главной составляющей силы резания P_z :

$$P_y = 0,4 \cdot P_z. \quad (4)$$

Зависимости (3) и (4) очень грубо оценивают значения P_y , а полученные результаты нельзя считать надежными и использовать на практике. Стоит отметить, что коэффициенты и показатели степени, входящие в формулу (3), в различных справочниках принимают разные значения [3].

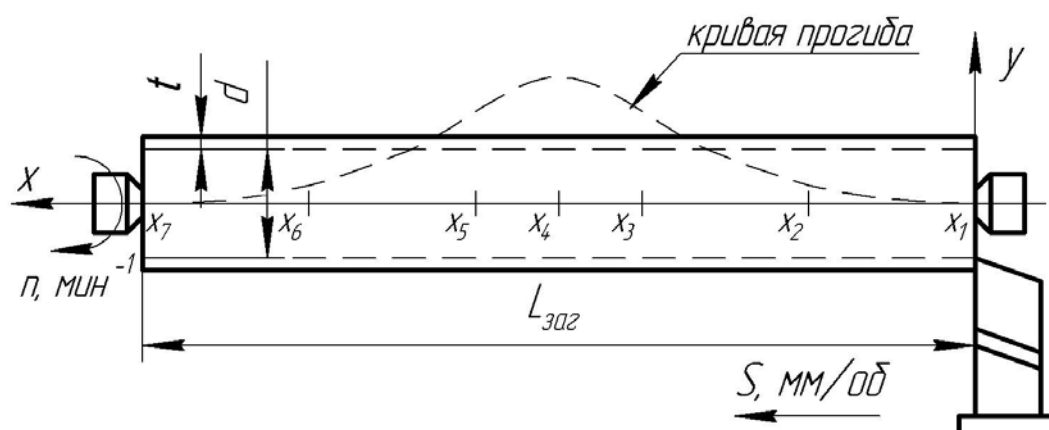


Рис. 1. Схема закрепления «центр-центр»

В таблице 1 приведены результаты расчета величин прогиба по различным справочникам для схемы, представленной на рис. 1, при продольном точении вала диаметром 50 мм, длиной 500 мм из стали 20 твердосплавным резцом Т5К10 ($\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$).

Как видно из таблицы 1, ошибка в расчете силы резания P_y составляет от 44% до 262%, причем в отрицательную сторону. Это значит, что на практике величина прогиба будет большей, чем при расчете, а, следовательно, погрешность обработки будет больше допустимой. По данным таблицы 1 составлен график (рис. 2), на котором изображены кривые, характеризующие стрелу прогиба вала.

Таблица 1

**Величины прогиба заготовки под действием радиальной составляющей
силы резания P_y при расчете по различным справочникам**

Сталь 20 – Т5К10; закрепление: «центр+центр»; L = 500 мм; d = 50 мм									
Справочник (метод)	x_i , мм	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	
		0	100	200	250	300	400	500	
	P_y , Н	U_i , МКМ							
		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	
А. Г. Косиловой, 1985 г.	562	0	9,31	20,95	22,73	20,95	9,31	0	
А. М. Дальского, 2003 г.	427	0	7,07	15,91	17,27	15,91	7,07	0	
Ю. В. Барановского, 1972 г.	448	0	7,42	16,70	18,12	16,70	7,42	0	
Е. И. Стружестраха, 1960 г.	403	0	6,68	15,02	16,30	15,02	6,68	0	
А. Н. Оглоблина, 1960 г.	859	0	14,23	32,02	34,74	32,02	14,23	0	
Общемаш. нормы времени и режимов резания	аналит.	343	0	5,68	12,78	13,87	12,78	5,68	0
	табл.	415	0	6,87	15,47	16,78	15,47	6,87	0
Эксперим. [3]	1240	0	20,54	46,22	50,15	46,22	20,54	0	
min ошибка	- 44%	0	- 44%	- 44%	- 44%	- 44%	- 44%	0	
max ошибка	- 262%	0	- 262%	- 262%	- 262%	- 262%	- 262%	0	

Очевидно, что традиционные справочные модели определения величины P_y нельзя использовать для точностных расчетов, поскольку они дают очень большие погрешности по сравнению с экспериментально измеренными значениями силы резания.

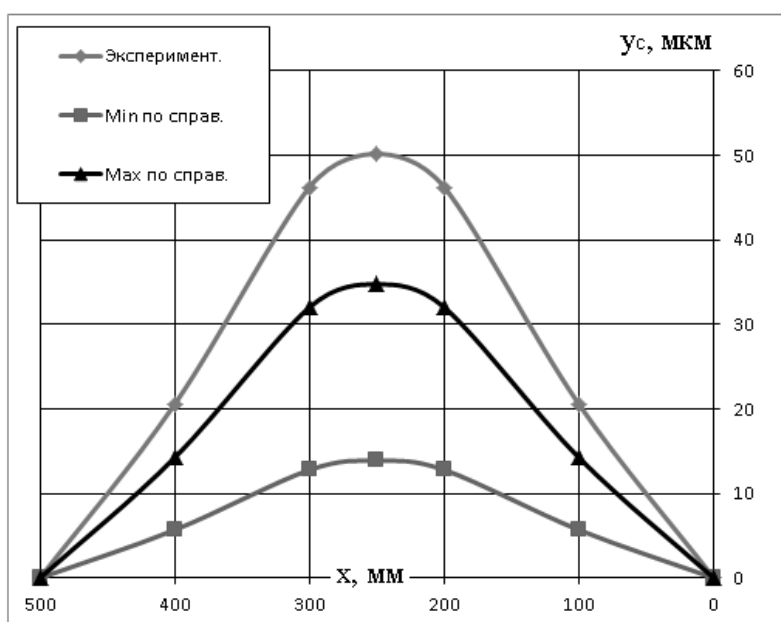


Рис. 2. Кривая прогиба детали при расчете по разным справочникам

Ошибка в расчетах по формуле (3) возникает из-за использования усредненных эмпирических коэффициентов и поправок на материалы заготовки и инструмента. Они не отражают реальные механические свойства каждой контактируемой пары: инструмент-заготовка, поскольку, из-за металлургических особенностей производства, механические свойства материалов заготовки и инструмента могут колебаться в очень широком диапазоне, хотя химический состав при этом будет колебаться в пределах допуска [3], [10]. Кроме того, согласно положениям условной схемы резания предполагается, что с ростом предела прочности обрабатываемого материала, составляющие силы резания будут возрастать. Однако практика показывает, что это предположение не работает при скоростях выше зоны наростообразования. Такое явление объясняется с помощью положений реальной схемы процесса стружкообразования, предложенной профессором Н.В. Талантовым [10]. Оно связано с тем, что в условиях высокоскоростного резания интегральная сумма сил, действующих на переднюю грань инструмента определяется не только величиной действующих напряжений, но и суммарной длиной участков пластического и вязкого контакта, что определяется теплопроводностью контактируемых пар [3].

В работе [3] подробно описан альтернативный способ определения величины силы резания P_y , используя который можно получить математическую модель, позволяющую рассчитать значения подачи, которые обеспечат заданную точность токарной обработки. Суть метода заключается в получении данных о термоЭДС каждой контактной пары «инструмент-заготовка» во время пробного прохода на определенных режимах резания и расчете значений силы резания по измененным зависимостям. В этом способе величина термоЭДС используется не как традиционная характеристика уровня температур в зоне резания, а как интегральный показатель физико-механических свойств конкретной контактной пары. Кратковременный пробный проход является своеобразным предварительным тестированием свойств заготовки и резца, а величина термоЭДС – мерой соотношения этих

свойств. Сила резания, согласно [3], определяется по следующей формуле:

$$P_y = (A_y + k_y \cdot E_{np}) \cdot t^{0,9} \cdot S^{0,6} \cdot V^{-0,3}, \quad (5)$$

где E_{np} – термоэлектродвижущая сила, при пробном проходе, мВ;

A_y, k_y – постоянные, определенные из условий предварительной обработки.

Ошибка при расчете по формуле (5) лежит в пределах 5-10% [3]. Для различных схем закрепления были получены выражения, позволяющие рассчитать величины подачи, которые позволят компенсировать значения прогиба заготовки в каждом конкретном сечении до допустимых пределов (определяемых допуском формы):

для схемы закрепления «в патроне»:

$$S_p \leq 0,6 \sqrt{\frac{k_i \cdot Td \cdot 3 \cdot E \cdot J \cdot 10^3}{(L_{заг} - x_p)^3 \cdot (A_y + k_y \cdot E_{np}) \cdot t^{0,9} \cdot V^{-0,3} \cdot 10}}; \quad (6)$$

для схемы закрепления «патрон-центр»:

$$S_p \leq 0,6 \sqrt{\frac{k_i \cdot Td \cdot 12 \cdot E \cdot J \cdot L_{заг}^3 \cdot 10^3}{x_p^2 \cdot (L_{заг} - x_p)^3 \cdot (3 \cdot L_{заг} - x_p) \cdot (A_y + k_y \cdot E_{np}) \cdot t^{0,9} \cdot V^{-0,3} \cdot 10}}; \quad (7)$$

для схемы закрепления «центр-центр»:

$$S_p \leq 0,6 \sqrt{\frac{k_i \cdot Td \cdot 3 \cdot E \cdot J \cdot L_{заг} \cdot 10^3}{x_p^2 \cdot (L_{заг} - x_p)^2 \cdot (A_y + k_y \cdot E_{np}) \cdot t^{0,9} \cdot V^{-0,3} \cdot 10}}; \quad (8)$$

где x_p – координата резца, мм;

10 – переводной коэффициент силы резания (кгс в Н);

10^3 – коэффициент, который учитывает перевод размерности прогиба из мкм в мм.

С использованием приведенных выше зависимостей была написана программа для ЭВМ [4], результатом работы которой является массив значений подачи, которые должны изменяться через определенный шаг в процессе обработки. На рис. 3 приведен скриншот окна вывода данных:

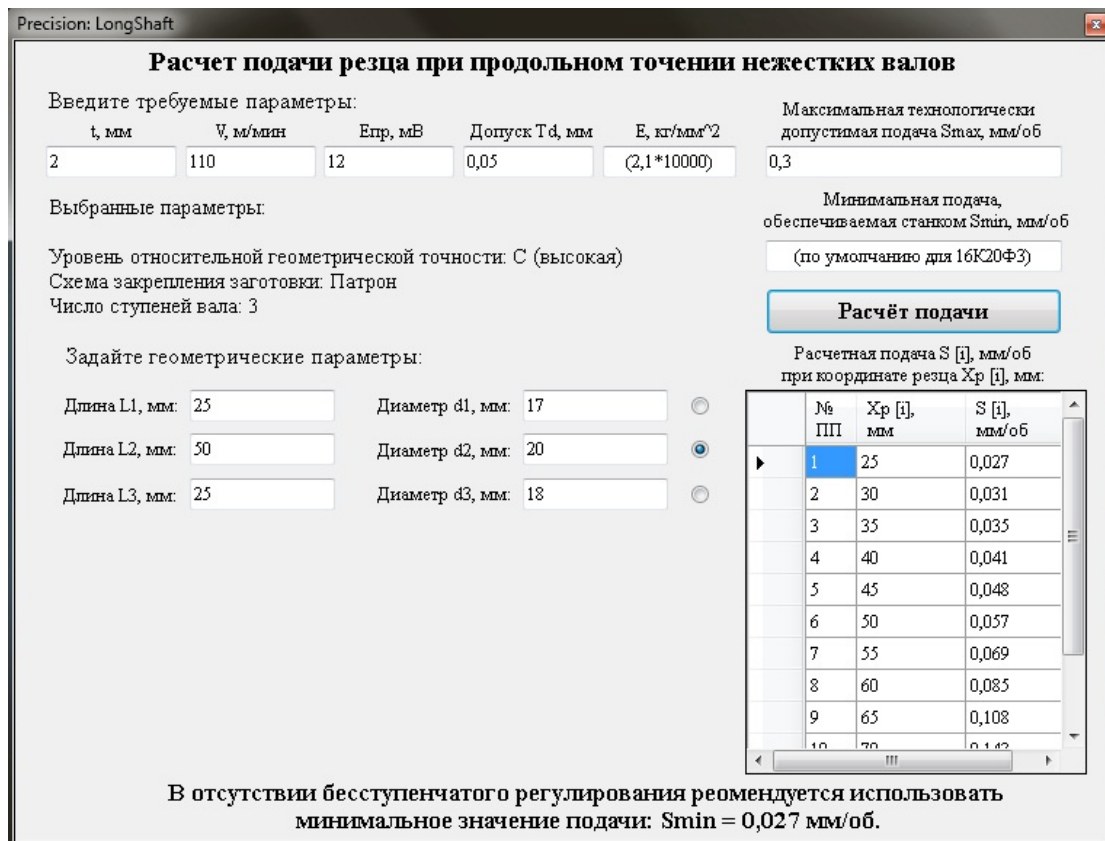


Рис. 3. Скриншот окна программы

Заключение и выводы.

Были рассмотрены проблемы обеспечения точности нежестких валов на токарных станках с ЧПУ, проанализированы существующие подходы к решению данного вопроса. Представлены математические зависимости, позволяющие определять значения подачи, которые обеспечивают поддержание величины погрешности формы, вызываемой прогибом детали, в пределах допуска формы.

Литература:

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М: Машиностроение, 1985. – 656 с.
2. Режимы резания металлов. Справочник / под ред. Ю. В. Барановского. – М.: Машиностроение, 1972. – 364 с.

3. *Плотников, А. Л.* Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ : монография / А. Л. Плотников, А. О. Таубе; ВолгГТУ. – Волгоград : Волгогр. науч. изд-во, 2003. – 184 с.

4. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013613253 от 28 марта 2013 г. РФ, МПК (нет). Расчёт подачи резца при продольном точении нежёстких валов / Плотников А.Л., Чигиринский Ю.Л., Фролов Е.М., Жданов А.А.; ВолгГТУ. - 2013.

5. *Балакшин Б. С.* Необходимость оборудования программных станков системами адаптивного управления / Б.С. Балакшин // Станки и инструмент. – 1973. – №3. – С. 4-6.

6. *Лищенко Н. В.* Силовые параметры резания в системах адаптивного управления станками / Н.В. Лищенко // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы науч.-техн. конф. – Киев: АТМ Украины, 2010. – С. 77-81.

7. *Базров Б.М.* Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.

8. *Лизогуб, В. А.* Влияние проектных параметров узлов токарного станка и режимов резания на точность обработки / В. А. Лизогуб // СТИН. – 2007. – № 3. – С. 8-10

9. *Кобзев, А. А.* Модель процесса токарной обработки в системе автоматического управления / А. А. Кобзев, Л. К. Генералов // СТИН. – 2008. – № 11. – С. 26 – 29.

10. *Талантов, Н. В.* Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов – М : Машиностроение, 1992. – 240 с.

Статья отправлена: 08.12.2015 г.

© Жданов А. А., Плотников А. Л., Чигиринский Ю. Л., Фирсов И. В.