А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ж. С. Тихонова, Р. И. Аржуханов

**АНАЛИЗ ПРИЧИН ОШИБОК ПРИ РАСЧЕТЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ИЗ-ЗА УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: alex_128@mail.ru

Рассматриваются вопросы, связанные с достоверностью результатов расчета погрешностей токарной обработки деталей типа «вал» из-за упругих перемещений элементов технологической системы по традиционным справочным моделям.

Ключевые слова: погрешности обработки, динамическая жесткость, статическая жесткость, радиальная составляющая силы резания.

A. A. Zhdanov, A. L. Plotnikov, Zh. S. Tikhonova, R. I. Arzhukhanov

**ANALYSIS OF THE CALCULATING ERRORS DUE TO ELASTIC MOVEMENTS
OF TECHNOLOGICAL SYSTEM ELEMENTS DURING TURNING**

Volgograd State Technical University

The issues of reliability of the results of calculating the error of turning parts of the "shaft" type due to the elastic displacements of the technological system elements according to traditional reference models are considered.

Keywords: processing errors, dynamic stiffness, static stiffness, radial component of the cutting force.

Современные машиностроительные станки, особенно прецизионные, обладают достаточно большой жесткостью узлов, что положительно сказывается на величине суммарной погрешности обработки за счет уменьшения погрешностей из-за упругих перемещений элементов технологической системы. Тем не менее вопросы, связанные с обеспечением требуемой точности обработки, определением погрешностей обработки на этапе разработки технологического процесса, выбором и корректировкой режимов резания в процессе обработки на основе получения оперативной информации (об изме-

нении физико-механических свойств контактных пар инструмент-заготовка, геометрии режущего инструмента, сил резания и т. д.) по-прежнему являются актуальными.

Так, например, при определении погрешностей токарной обработки из-за упругих перемещений элементов технологической системы можно воспользоваться следующими традиционными зависимостями [1, 2]:

– при закреплении в центрах:

$$y = P_y \cdot \left[\frac{x^2 \cdot (L_{\text{заг}} - x)^2}{3 \cdot E \cdot J \cdot L_{\text{заг}}} + \frac{1}{j_{\text{см}}} \right]; \quad (1)$$

– при закреплении в патроне с поджатием задним центром:

$$y = P_y \cdot \left[\frac{x^2 \cdot (L_{\text{заг}} - x)^3 \cdot (3 \cdot L_{\text{заг}} - x)}{12 \cdot E \cdot J \cdot L_{\text{заг}}^3} + \frac{1}{j_{\text{ст}}} \right], \quad (2)$$

где $L_{\text{заг}}$ – длина заготовки между точками закрепления, мм; x – расстояние от правого торца до места приложения силы, мм; E – модуль нормальной упругости, МПа (для конструкционных и углеродистых сталей $E = (1,9...2,1) \cdot 10^5$ МПа); P_y – радиальная составляющая силы резания, Н; $j_{\text{ст}}$ – жесткость станка, Н/мм, которая для приведенных случаев закрепления определяется следующим образом [1]:

$$\frac{1}{j_{\text{ст}}} = \frac{1}{j_{\text{суп}}} + \left(\frac{x}{L_{\text{заг}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{j_{\text{п.б.}}} + \left(\frac{L_{\text{заг}} - x}{L_{\text{заг}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{j_{\text{з.б.}}}, \quad (3)$$

где $j_{\text{п.б.}}$ – жесткость передней бабки, Н/мм; $j_{\text{з.б.}}$ – жесткость задней бабки, Н/мм; $j_{\text{суп}}$ – жесткость суппорта, Н/мм; J – приведенный момент инерции сечения заготовки мм⁴, для сплошных валов определяемый по формуле [1, 2]:

$$J = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр}}^4}{64} \approx 0,05 \cdot d_{\text{пр}}^4. \quad (4)$$

Если проанализировать величины, входящие в состав формул (1–2), можно сделать следующие выводы:

– геометрические параметры заготовки, такие как длина заготовки между точками закрепления и координата резца, определяются достаточно точно, поэтому влиянием погрешности их определения на результаты расчета можно пренебрегать;

– погрешность, вносимая расчетами момента инерции по приведенному диаметру, составляет менее 10 % [1]. Данная погрешность может быть снижена путем внесения соответствующих корректировок в расчетную формулу (5) для учета изменения приведенного диаметра заготовки за счет съема стружки в процессе обработки, а также за счет выполнения расчета величины упругих перемещений y для каждого конкретного технологического перехода;

– модуль нормальной упругости является одной из величин, характеризующих физико-механические свойства обрабатываемого материала. Безусловно, использование справочной величины, особенно, усредненной для всех марок стали, снижает точность результатов расчета. Ошибка при таком подходе будет лежать в пределах ± 5 %. Влияние данной параметра также может быть снижено, например, за счет

принудительного тестирования физико-механических свойств заготовок на этапе входного контроля;

– величину погрешности, вносимой традиционными справочными моделями расчета радиальной составляющей силы резания P_y , сложно спрогнозировать, однако она может достигать 100 % и более [3, 4]. Данная погрешность может быть уменьшена до уровня в $\pm 10...15$ % за счет разработки более совершенных математических моделей, предварительной или оперативной диагностики физико-механических свойств материалов заготовки и инструмента [3, 4];

– более подробно следует остановиться на параметре жесткости элементов технологической системы.

Жесткость элементов технологической системы изменяется в процессе эксплуатации оборудования и технологической оснастки. Производителями рекомендуется выполнять периодические проверки параметров жесткости станка на соответствие их паспортным данным, которые и используются при расчетах погрешности обработки, связанных с упругими перемещениями элементов технологической системы. Данный факт уже говорит о том, что действительное текущее значение параметра жесткости станка при расчетах неизвестно. Кроме того, различают динамическую $j_{\text{дин}}$ и статическую жесткость $j_{\text{ст}}$, причем коэффициент динамичности (отношение $j_{\text{ст}} / j_{\text{дин}}$) составляет 1,2...2,0 [1, 2]. Динамическая жесткость определяется производственными или экспериментальными методами [5].

В расчетах погрешности обработки, связанных с упругими перемещениями элементов технологической системы, используется параметр статической жесткости, отчасти, потому что определить параметр $j_{\text{дин}}$ для каждого элемента технологической системы затруднительно (данный параметр обычно определяется для системы в целом). Таким образом, параметр жесткости вносит существенную ошибку в расчет погрешностей обработки. Кроме того, при определении динамической жесткости станка производственным методом типичной рекомендацией является определить усилие резания P_y по справочным математическим моделям [5]. Это вносит еще большую неопределенность в результаты определения параметров жесткости и оценки коэффициента динамичности. Хотя, стоит отметить, что существуют способы определения динамической жесткости, при которых

усилие резания либо измеряется, либо прикладывается нагружающим устройством [5, 6]. Такие методы позволяют увеличить достоверность определения параметра $j_{\text{дин}}$, но не отвечают на вопрос: как учесть этот параметр в расчетах?

В таблице представлены данные расчета максимальной погрешности от упругих перемещений элементов технологической системы при токарной обработке нежесткого вала. Исходные данные: резец токарный проходной:

$\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $r = 1$ мм; схема закрепления заготовки – «в центрах»; материал резца: Т5К10; режимы обработки: $V = 110$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об, $t = 2$ мм; материал заготовки: сталь 20; геометрия заготовки: $\phi 50 \times 400$ мм; жесткость элементов технологической системы принята по паспорту токарно-винторезного станка 16К20; величина радиальной составляющей силы резания определена по пяти популярным машиностроительным справочникам.

Результаты расчета погрешностей от упругих перемещений элементов технологической системы

№ п./п.	Авторы справочника	Координата, мм	Жесткость станка, Н/мм	Сила резания, Н	Максимальная расчетная погрешность, мкм
		x	$j_{\text{ст}}$	P_y	y_{max}
1	А. Г. Косилова	200 (0,5*L)	6857	560	93
2	А. М. Дальский			430	71
3	Ю. В. Барановский			450	75
4	Е. И. Стружестрах			400	66
5	А. Н. Оглоблин			860	143
Максимальный разброс, max/min, %				215	215

Согласно сравнительному расчету, очевидно, что существенное влияние на величину ошибки при определении y_{max} оказывает разброс при расчете радиальной составляющей силы резания, о чем уже упоминалось в работах [1, 4]. Однако, помимо выше сказанного, нужно учитывать следующие тезисы:

– сложность учета в условиях реального производства разницы между статической и динамической жесткостью станка, что приводит к необходимости искусственно завышать коэффициент динамичности при расчете погрешностей для уменьшения вероятности получения брака;

– использование при определении динамической жесткости производственным методом расчетных моделей определения усилия резания P_y , что вносит дополнительные погрешности, которые могут достигать 100% и более при расчете по различным машиностроительным справочникам [1, 4].

Выводы

1. Показано, что традиционный производственный метод определения параметра динамической жесткости элементов технологической системы не позволяет получить достоверные результаты, которые могут быть использованы для прогнозирования погрешностей обработки на этапе проектирования технологического процесса.

2. Одной из причин расхождений результатов расчета погрешностей обработки является использование классических справочных моделей радиальной составляющей расчет силы резания, однако, эту погрешность можно минимизировать с использованием методов предварительной или оперативной диагностики физико-механических свойств контактных пар «инструмент-заготовка» и разработки адекватных и достоверных математических моделей.

3. Необходимо более детальное изучение и внедрение новых методов определения жесткости элементов технологической системы, установления достоверных и физически обоснованных взаимосвязей между параметрами статической и динамической жесткости.

4. Необходима доработка и четкое соблюдение на предприятиях методик по контролю параметров жесткости станочного оборудования в течение срока эксплуатации с целью предотвращения превышения действительными величинами жесткости паспортных значений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учеб. для вузов / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отдел. – 1985 г. – 514 с.
2. Балакишин, Б. С. Адаптивное управление станками / Б. С. Балакишин. – М. : Машиностроение, 1973. – 688 с.
3. Жданов, А. А. The mathematical models for cutting force calculation during structural and corrosion-resistant

steels` parts processing / А. А. Жданов, О. А. Курсин, С. Б. Фам // MATEC Web of Conferences. Vol. 298 : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019) (Sevastopol, Russia, September 9-13, 2019) / ed. by S. Bratan ; Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISiS», Polzunov Altai State Technical University, Inlink Ltd., International Union of Machine Builders. – [Publisher : EDP Sciences], 2019. – 5 p. – URL : <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201929800099>.

4. Повышение точности токарной обработки нежестких деталей из конструкционных сталей на станках с ЧПУ / А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский,

И. В. Фирсов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5 (184) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 11–14.

5. Производственный способ определения жесткости узлов станков / М. В. Матрохин, Е. И. Федин, А. С. Ямников // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула, 2012. Вып. 12. Ч. 2. – С. 126–131с.

6. Пат. 2094177 Российская Федерация, МПК - В 23 В 25/06. Устройство для определения радиальной динамической жесткости шпиндельных узлов металлорежущих станков / Пуш А. В., Юркевич В. В, Шолохов В. Б. ; заявитель и патентообладатель Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». – № 95110422/02 ; заявл. 21.06.1995 ; опубл. 27.10.1997.