

инструментов раздельной схемы обработки, которая была разработана на примере зуборезных головок [3–7] и распространена на червячные зуборезные фрезы [8], на зуборезные долбяки [9] и обкаточные резцы [10].

Основное назначение концевой фрезы с равной стойкостью боковых и торцевых режущих лезвий состоит во внедрении ее в массовое производство с целью экономии дорогостоящих инструментальных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
2. Справочник металлста. В 5 т. / Под ред. А. Н. Малова. М.: Машиностроение, 1977. Т. 3. 748 с.
3. Черкашин В. П. Анализ температуры резания при нарезании зубьев с раздельной схемой обработки // Вестник машиностроения. 2004. № 8. С. 48–51.

4. Черкашин В. П. Анализ стойкости зуборезных инструментов с раздельной схемой обработки // Вестник машиностроения. 2006. № 6. С. 53–58.

5. Пат. 1775247 РФ: Зуборезная головка для нарезания конических колес с круговыми зубьями: МКЙ В23 F 21/34.

6. Горманюк Н. А., Черкашин В. П. Зуборезная головка с раздельной схемой обработки активной части зубьев и оснований зубьев конических колес // Научно-технические достижения и передовой опыт в угольной промышленности: Информ. сб. М.: ЦНИЭИуголь, 1990. № 8. С. 26, 27.

7. Черкашин В. П. Выбор параметров зуборезной головки с раздельной схемой обработки // СТИН. 2003. № 2. С. 34–37.

8. Черкашин В. П. Зуборезный инструмент для изготовления тяжело нагруженных зубчатых передач угледобывающих комбайнов // Горные машины и автоматика. 2002. № 3. С. 8–11.

9. Черкашин В. П., Старовойтов В. Г. Зуборезный инструмент для производства на отечественных заводах запчастей для импортной горнодобывающей техники // Горные машины и автоматика. 2001. № 2. С. 69–71.

10. Черкашин В. П., Соколов И. И., Ищенко В. А. Производство зубчатых колес очистных комбайнов в современных условиях // Техника машиностроения. 2001. № 2. С. 69–71.

УДК 621.941.1-187

В. В. ЮРКЕВИЧ, канд. техн. наук, М. М. КЛИМАНОВ, В. В. БЫКОВ
(БГТУ "Станкин")

Показатели точности при токарной обработке

Теоретически процесс формообразования детали на токарном станке подобен процессу образования идеального цилиндра, базирующегося на геометрических понятиях. Поверхность цилиндра можно представить как след движения образующей по направляющей. На токарном станке образующая воспроизводится путем движения суппорта, а направляющая — путем вращения шпинделя. Согласованные движения заготовки и резца, создающие поверхность цилиндра, называют формообразующими.

Показатели точности обработанной детали зависят в первую очередь от того, с какой точностью воспроизведены формообразующие движения при ее изготовлении. Поэтому основными выходными параметрами точности токарного станка являются траектории движения формообразующих элементов. В реальных станках траектории формообразования значительно отличаются от идеальных теоретических, что приводит к возникновению на обработанной поверхности погрешностей. Погрешность траектории оси заготовки и погрешность перемещения резца приводят к возникновению целого ряда погрешностей детали как в поперечном, так и в продольном направлениях. Однако все погрешности являются результатом взаимодействия поверхности заготовки и резца, а следовательно, можно предположить, что между ними должна существовать взаимосвязь. Впервые эта мысль была высказана А. П. Соколовским в 1951 г. [1].

В статье делается попытка определить связь между отдельными показателями точности деталей, обработанных на токарном станке.

Метод определения траекторий формообразующих элементов запатентован [2–4] и достаточно подробно описан в работах [5–8]. В настоящее время разработана программа "Архимед" третьего поколения, которая автоматически обрабатывает данные, строит траектории оси заготовки и резца, рассчитывает геометрический

образ и определяет показатели точности в поперечном и продольном сечениях.

Экспериментальные исследования проводили на токарно-винторезном станке ТВ-7 в условиях реального резания и в реальном времени. В качестве заготовок использовали предварительно обработанные втулки из стали 35, которые закрепляли на прецизионной оправке. Обработку проводили резцом с твердосплавной пластиной Т15К6 с углами заточки $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$; $\gamma = 0$; $\alpha = 6^\circ$; точение — при частоте вращения шпинделя $n = 105 \div 975$ об/мин, глубине резания $t = 0,1 \div 1,6$ мм и подаче $S = 0,05 \div 0,16$ мм/об. В качестве бесконтактных датчиков перемещения использовали вихретоковые датчики серии АЕ2Х, состоящие из вихретокового пробника, кабельного переходника, удлинительного кабеля, драйвера, блока питания и подключенные к плате ввода-вывода информации L-761.

На рис. 1 приведены траектории формообразующих элементов, снятые при $n = 555$ об/мин, $t = 0,37$ мм и $S = 0,16$ мм/об. Программа "Архимед" делает выборку

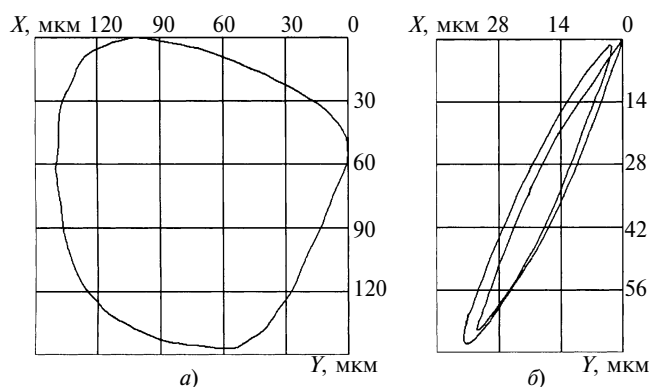


Рис. 1

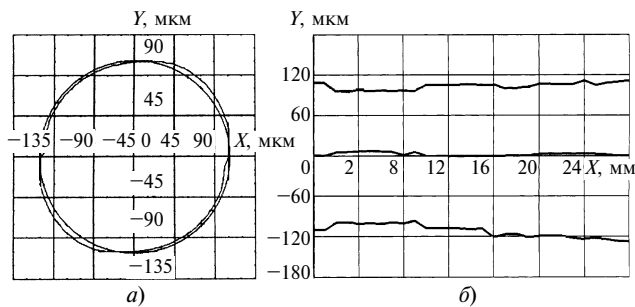


Рис. 2

показателей, равную 20 оборотам шпинделя, проводит статистическую обработку [9] и выводит на экран монитора осредненные траектории оси заготовки и резца. Траектория оси заготовки (см. рис. 1, а) имеет форму неправильной трапеции, что объясняется кинематическими взаимодействиями дорожек и тел качения подшипников передней опоры. Траектория оси заготовки в разных сечениях по длине заготовки изменяется, но в небольших пределах, что объясняется стохастической природой процессов обработки заготовки, а также изменениями в технологической системе при перемещении резца вдоль заготовки. В первую очередь следует отметить изменение податливости технологической системы. Плавная форма траектории говорит о том, что процесс обработки протекает стабильно при практическом отсутствии вибраций. При глубине резания более 0,8 мм на траекториях явно проявляются вибрации. На рис. 1, б приведена траектория резца за один оборот шпинделя, которая имеет форму эллипса, что было теоретически доказано В. А. Кудиновым [11].

Геометрические образы обработанной поверхности в поперечном (рис. 2, а) и продольном (рис. 2, б) сечениях построены с помощью программы "Архимед" [2–4]. Обработанная поверхность в поперечном сечении имеет явно выраженную овальность.

Для расчета показателей точности используют базовую окружность. По стандарту DINIS01101 выбран вариант LSC, который рекомендует определять радиус базовой окружности как минимальную величину суммы квадратов расстояний от базовой окружности до профиля геометрического образа. На наш взгляд, этот вариант наиболее правильно отражает суть физических процессов, происходящих при соединении двух деталей с натягом, когда выступы в отверстиях и на валу пластически деформируются и материал из них перемещается во впадины отверстий и вала, образуя соединение, близкое к базовой окружности. Базовая окружность позволяет рассчитать показатели точности.

Усредненные показатели точности, рассчитанные по 15 поперечным сечениям заготовки, обработанной на указанных выше режимах, приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что при чистовой обработке детали все показатели точности изменяются сравнительно мало, а из их соотношений между собой можно сделать вывод, что теоретически они могут изменяться в пределах: $\Delta_{\text{пр}} = (1 \div 2)\Delta_{\text{ок}}$; $\Delta_{\text{ов}} = (1 \div 2)\Delta_{\text{ок}}$.

Из рис. 2, б видно, что в продольном сечении заготовки форма обработанной поверхности имеет явно выраженную корсетность. Это говорит о высокой жесткости заготовки, что соответствует действительности: заготовка имеет диаметр 50 мм при длине 90 мм. При обработке заготовку закрепляли на конусе шпинделя и поджимали центром задней бабки. Увеличения обработанного диаметра возле шпиндельной бабки и задней бабки соответствуют их неодинаковой податливости. Показателей точности в продольном сечении рассчитывали также по методике DINIS01101 с использованием базового цилиндра (табл. 2). Как видно из табл. 2, показатели точности в продольном сечении несколько больше показателей точности в поперечном сечении, что обычно для токарной обработки. Программа "Архимед" имеет возможность производить построение 160 продольных сечений обработанной поверхности.

На рис. 3 приведено изменение показателей точности в поперечном сечении по длине L заготовки при $n = 975$ об/мин, $t = 1,6$ мм и $S = 0,12$ мм/об. Как видно из рисунка, показатели точности по длине заготовки изменяются таким образом, что расстояние между кривыми остается практически постоянным, что говорит об определенной связи между ними. Все показатели точности увеличиваются в направлении к задней бабке. Это объясняется увеличением диаметра геометрического образа в этом направлении, что сопровождается и увеличением погрешностей. Так как показатели точности, приведенные на рис. 3, соответствуют грубой об-

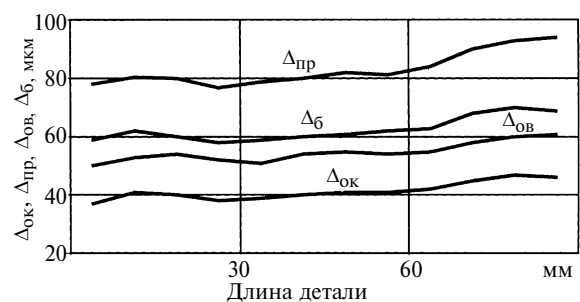


Рис. 3

Таблица 1

Показатель точности	Величина погрешности, мкм	
	минимальная	максимальная
Отклонение от круглости $\Delta_{\text{ок}}$	10	16
Овальность $\Delta_{\text{ов}}$	13	22
Погрешность размера $\Delta_{\text{пр}}$	20	31
Радиальное биение $\Delta_{\text{б}}$	15	23

Таблица 2

Показатель точности	Величина погрешности, мкм	
	минимальная	максимальная
Отклонение профиля продольного сечения $\Delta_{\text{о. п. п. с}}$	24	44
Отклонение от цилиндричности $\Delta_{\text{ц}}$	—	44
Отклонение от соосности оси $\Delta_{\text{ос}}$	—	18
Полное радиальное биение $\Delta_{\text{п. б}}$	—	55

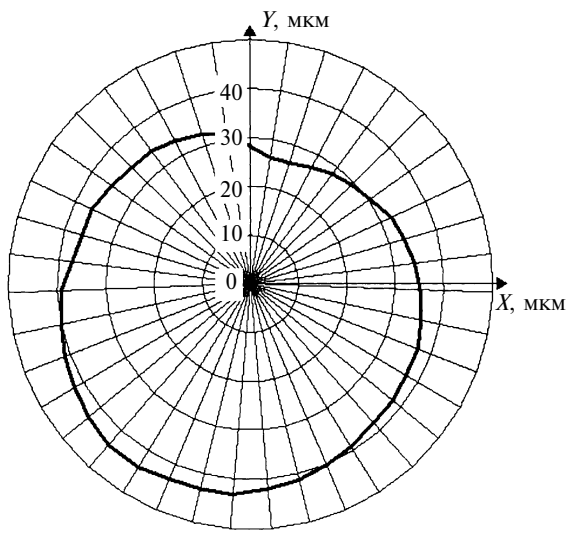


Рис. 4

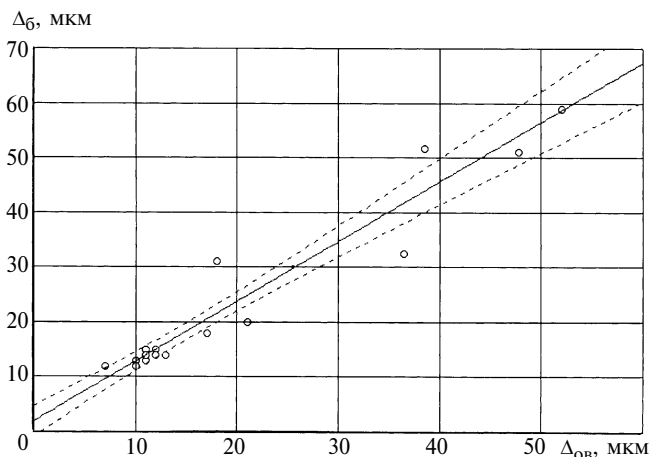


Рис. 5

работке, то, естественно, они значительно больше показателей точности, приведенных в табл. 1.

На рис. 4 показано отклонение профиля продольного сечения, построенное в поперечном сечении заготовки. Как видно из рисунка, отклонение профиля продольного сечения при грубой обработке сильно изменяется при вращении заготовки, что говорит об искажениях обработанной поверхности в трехмерном пространстве. Сравнение показателей на рис. 3 и 4 показывает, что отклонение профиля продольного сечения практически вдвое превышает погрешность размера в поперечном сечении, что объясняется как податливостью технологической системы, так и непрямолинейностью направляющих станины.

Всего было проведено 23 испытания при разных частотах вращения шпинделя, глубинах резания и подачах, что позволило установить корреляционные зависимости. О существовании корреляционных зависимостей между отдельными показателями точности можно судить и по данным табл. 1 и 2. Как известно, задача корреляционного анализа — изучить и измерить степень зависимости случайных величин. Для расчетов была использована линейная корреляция, когда равным изменениям одной вели-

чины в среднем соответствуют равные изменения другой величины. Для расчетов использовали стандартную программу Statistica 6.0. На рис. 5 приведена корреляционная зависимость между овалностью $\Delta_{ов}$ и радиальным биением Δ_b , скопированная с экрана монитора. Как видно из рисунка, показатели точности располагаются в ограниченной зоне вблизи от корреляционной прямой, что говорит о достаточно высоком коэффициенте корреляции. В табл. 3 приведены корреляционные уравнения и полученные значения коэффициента корреляции для поперечного сечения обработанной поверхности.

Прежде всего, следует отметить, что значения коэффициента корреляции очень высоки — самый минимальный составляет 0,968. Большая величина коэффициента корреляции говорит о том, что связь показателей точности между собой очень велика и приближается к функциональной связи. Из рассмотрения корреляционных уравнений видно, что корреляционные связи образуют две группы. К первой группе относятся те связи, в которых у второго показателя точности коэффициент изменяется в пределах $1,477 \div 1,967$ — это овалность, погрешность размера, радиальное биение. Грубо говоря, отклонение от круглости почти в 2 раза меньше овалности, погрешности размера и радиального биения. Ко второй группе связей относятся те, в которых коэффициент составляет $0,751 \div 0,988$ — это овалность, погрешность размера, радиальное биение. Таким образом, это погрешности одного порядка.

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что устанавливать допуски и посадки на рабочих чертежах деталей независимо друг от друга нельзя. Установив какой-то один параметр допуска, тем самым обуславливают и величину других показателей точности. В инженерной практике обычно исходят из определения посадок, которые регламентируются разными стандартными и отраслевыми нормами. После чего определяют другие показатели точности, в основном отклонения от круглости и биение. В табл. 4 приведены допуски на точность изготовления колец подшипников качения по данным ЭНИМСа.

Из сравнения приведенных в табл. 4 данных с выведенными корреляционными зависимостями (см. табл. 3) можно отметить следующее. В общем, данные табл. 4 близки тем величинам, которые определяются корреляционными зависимостями. Максимальное расхождение между ними не превышает 1,55 мкм. Следует отметить, что окончательная обработка колец подшипников проводится на шлифовальных станках, а не на токарных, как это происходило в эксперименте. Корреляционные

Таблица 3

Показатель точности	Корреляционное уравнение	Коэффициент корреляции
$\Delta_{ок}, \Delta_{ов}$	$\Delta_{ов} = -0,220 + 1,250\Delta_{ок}$	0,965
$\Delta_{ок}, \Delta_{пр}$	$\Delta_{пр} = 0,698 + 1,967 \Delta_{ок}$	0,999
$\Delta_{ок}, \Delta_b$	$\Delta_b = 0,376 + 1,477 \Delta_{ок}$	0,966
$\Delta_{пр}, \Delta_{ов}$	$\Delta_{ов} = -0,741 + 0,639 \Delta_{пр}$	0,969
$\Delta_{ов}, \Delta_b$	$\Delta_b = 1,959 + 1,090 \Delta_{ов}$	0,968
$\Delta_{пр}, \Delta_b$	$\Delta_b = -0,145 + 0,751 \Delta_{пр}$	0,999

Таблица 4

Диаметр отверстия внутреннего кольца, мм	Класс точности подшипника	Допуск на диаметр отверстия, мкм	Допуск на радиальное биение, мкм
50÷80	5	9	5
	4	7	4
	2	5	2,5

Таблица 5

Фирма-производитель	Отклонение от круглости, мкм	Допуск на диаметр, мкм	Радиальное биение, мкм
INA, FAG NSK	3/4 3,5/3,5	6/8 7/7	2,5/4 2,5/3
Примечание. В числителе приведены данные для внутреннего кольца подшипника, в знаменателе — для наружного.			

зависимости показателей точности при шлифовании могут, естественно, отличаться от таких же зависимостей при токарной обработке.

В табл. 5 приведены допуски, проставляемые на рабочих чертежах колец подшипников качения диаметром 50 ÷ 80 мм, по данным фирм, являющихся мировыми лидерами в производстве подшипников качения.

Сравнение данных табл. 5 с выведенными корреляционными соотношениями показывает, что допуск на диаметр и отклонения от круглости имеют разность, не превышающую 0,6 мкм, что, естественно, показывает хорошее соответствие выбранным ведущими фирмами допусков с полученными по корреляционным зависимостям. С другой стороны, рассчитанные соотношения

для зависимости биения и отклонения от круглости во всех случаях дали разность $2,4 \div 2,6$ мкм, что требует дополнительных исследований.

Таким образом, использование полученных корреляционных зависимостей между разными показателями точности в конструкторской практике позволит выбрать оптимальное соотношение между отдельными показателями точности, что будет способствовать как повышению качества изделия, так и совершенствованию технологического процесса, что в конечном итоге приведет к снижению себестоимости механической обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский А. П. Точность механической обработки и пути ее повышения. М.: Машгиз, 1951. 487.
2. Способ диагностики токарных станков по параметрам точности и устройство для его осуществления: Пат. 2123923 РФ: МПК⁶ В23 Q 15/00
3. Способ диагностики шпиндельного узла: Пат. 2124966 РФ: МПК⁶ В23 В25/06.
4. Способ автоматического управления точностью токарного станка: Пат. 2131802 РФ: МПК⁶ В23 Q 15/007.
5. Юркевич В. В. Параметрическая точность токарного станка // Вестник машиностроения. 1999. № 9. С. 30, 31.
6. Юркевич В. В. Точность детали в продольном направлении // Вестник машиностроения. 2001. № 2. С. 34–36.
7. Юркевич В. В. Система прогнозирования точности токарных станков // Вестник машиностроения. 2001. № 8. С. 44–48.
8. Юркевич В. В. К вопросу точности токарной обработки // Вестник машиностроения. 2004. № 2. С. 46–52.
9. Юркевич В. В. Испытания, контроль и диагностика технологических систем. М.: МГТУ "СТАНКИН". 2005. 360 с.
10. Юркевич В. В. Исследования точности токарных станков методом построения виртуальной копии обрабатываемой поверхности // Вестник машиностроения. 2006. № 12. С. 42–46.
11. Кудинов В. А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.

УДК 629.914.1.001.57

В. Д. ГУРИН, канд. техн. наук (МГТУ "Станкин")

Графическое моделирование составляющих силы резания на ПЭВМ при фрезеровании

Проанализированы математические модели, предназначенные для вычисления значений векторов сил как для встречной, так и для попутной схемы фрезерования. Рассмотрены схемы векторов сил, возникающих на зубьях фрезы. Приведена методика расчета мгновенных значений составляющих сил резания при участии в работе одного зуба и нескольких зубьев фрезы одновременно. Разработанная компьютерная программа позволяет графически моделировать силовые параметры при варьировании факторов, фрезерования, степени изнашивания главной задней поверхности и угла наклона главной режущей кромки.

An analysis of mathematical models for calculation of vector forces both for oncoming and down milling schemes has been presented. The vector forces schemes on the milling cutter teeth have been considered. A calculation technique of instantaneous values of cutting forces components at participation in working of one tooth and several teeth simultaneously has been presented. The developed software allows to simulate graphically the force parameters under variation of milling factors, degree of wear of major flank, and of major cutting edge inclination angle.

В современном машиностроении все в большей степени развиваются информационные цифровые системы, обеспечивающие постоянно возрастающие технико-экономические показатели эксплуатации высокотехнологического оборудования. Одной из таких систем является система диагностики и контроля состояния режущего инструмента. Эффективность этой системы зависит от степени ее автоматизации, т. е. система должна не только контролировать состояние объекта и сообщать результаты контроля, но и устанавливать диагностические признаки и их предельные значения в зависимости от условий механообработки.

Наиболее сложным с этой точки зрения является процесс фрезерования, характеризующийся большим разнообразием факторов, которые в свою очередь в зависимости от схем фрезерования изменяют свои значения в течение одного рабочего движения инструмента. Решить задачу автоматизации диагностики при фрезе-