

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАНКАХ ЧПУ

Юсубов Н.Д., Аббасова Г.М., Дадашов Р.Е., Гусейнов Ю.Э.
Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Ключевые слова: станок с ЧПУ, коническая поверхность, модели точности, чистовая обработка, твердосплавный инструмент, шероховатость поверхности.

Аннотация. В статье определены основные факторы, влияющие на точность обработки конических поверхностей на станках с ЧПУ, и построена математическая модель, учитывающая данные воздействия. Экспериментальные результаты показывают, что использование твердосплавного инструмента, правильно выбранный чистовой проход и компенсационные механизмы существенно повышают качество поверхности и точность угла конуса. Предложенная модель является эффективным инструментом для оптимизированной, стабильной и производительной обработки конических поверхностей.

INVESTIGATION OF MACHINING ACCURACY OF CONICAL SURFACES ON CNC MACHINES

Yusubov N.D., Abbasova H.M., Dadashov R.E., Guseynov Yu.E.
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Keywords: CNC machine, conical surface, accuracy models, finishing, solid carbide tool, surface roughness.

Abstract. In this paper, the main factors affecting the machining accuracy of conical surfaces on CNC machines have been identified, and a mathematical model incorporating these effects has been developed. Experimental results demonstrate that the use of solid carbide tools, proper finishing passes, and compensation mechanisms significantly improve surface quality and cone angle accuracy. The proposed model serves as an effective tool for the optimized, stable, and productive machining of conical surfaces.

Введение

Текущее состояние проблемы. Станки с числовым программным управлением (ЧПУ) – наиболее широко применяемое оборудование для высокоточной обработки конических поверхностей. Конические поверхности в основном обрабатываются на токарных, фрезерных и многоосевых станках с ЧПУ, а также на токарно-фрезерных обрабатывающих центрах. Данные поверхности формируются под различными углами конуса в зависимости от требований конструкции и зависят как от точности координатных перемещений станка, так и от корректного программирования траектории инструмента [1-9]. Типичная точность, достигаемая при обработке конических поверхностей на станках с ЧПУ, составляет: по размерной точности – IT6-IT8; по точности угла конуса – $\pm(5-20)$ микрорад, отклонение по образующей конуса – 2-10 микрон. Они изменяются в зависимости от класса используемого станка, жёсткости его конструкции, материала заготовки и качества инструмента. При использовании твердосплавного инструмента (высокопрочного и термостойкого инструмента, режущая часть которого изготовлена из смеси карбида вольфрама (WC) и кобальта (Co), часто

называемого просто карбидным инструментом), высокоточных станков с ЧПУ и правильно подобранных технологических режимов возможно достижение значений $Ra = 0,4$ мкм и ниже [10-12].

В процессе обработки конических поверхностей на станках с ЧПУ наблюдаются отклонения угла конуса, превышение нормативных значений шероховатости поверхности, погрешности формы, потери точности, вызванные термическими воздействиями, а также упругие деформации длинных и тонкостенных деталей. Эти проблемы в основном связаны с нарушением синхронности осей, ошибками интерполяции и калибровки, износом инструмента, неправильно выбранными режимами обработки, вибрациями и недостаточной жёсткостью крепления.

Актуальность проблемы. Обработка конических поверхностей на станках с ЧПУ является одной из важнейших областей современного машиностроения. Конические элементы широко применяются во множестве механизмов – в держателях инструментов, соединениях валов, гидравлических системах, шпиндельных соединениях и конструкциях, требующих высокой точности сборки.

Эта тема актуальна по следующим причинам: высокие требования к точности; развитие систем интерполяции и движения (новое поколение систем управления ЧПУ делает актуальным математическое моделирование точности); необходимость улучшения качества поверхности (низкая шероховатость имеет критическое функциональное значение); повышение производительности в промышленности (модели точности позволяют применять оптимальные режимы обработки); компенсация погрешностей инструмента и станка (при модельном подходе анализируются источники погрешностей и проводится их компенсация) [12, 13].

Таким образом, разработка моделей точности обработки конических поверхностей на станках с ЧПУ имеет высокую актуальность как с научной, так и с практической точки зрения и является важным направлением исследований, направленных на повышение эффективности современного производства.

Методология

Постановка проблемы. При обработке конических поверхностей на станках с ЧПУ наблюдаются отклонения угла конуса и точности формы, увеличение шероховатости поверхности, упругие деформации тонких деталей и неточная работа компенсационных механизмов. Эти факторы затрудняют достижение высокой точности и приводят к дополнительным затратам времени и ресурсов [6, 14, 15]. В исследовании в качестве обрабатываемого материала выбран среднеуглеродистый конструкционный металл – Сталь 45. Выбор Сталь 45 обоснован её широким применением в машиностроении, хорошей обрабатываемостью и тем, что она является типичным материалом для обработки конических поверхностей на станках с ЧПУ.

Цель исследования – определить основные факторы, влияющие на обработку конических поверхностей на станках с ЧПУ, смоделировать их воздействие на показатели точности, оценить отклонения формы и размеров вдоль образующей конуса, а также разработать теоретическую и практическую модель, направленную на повышение точности обработки. Разработанная модель будет

служить базой для выбора инструмента, оптимизации режимов обработки, управления вибрациями и правильной конфигурации систем компенсации ЧПУ при обработке конических поверхностей. Обработка конических поверхностей проводилась на токарном станке с ЧПУ с использованием сменных ромбических пластин типа NMG/DNMG из твердого сплава (WC-Co) в качестве режущего инструмента. Радиус режущей части, геометрические параметры инструмента и его износ были учтены в модели точности.

Исследование было проведено с целью анализа основных факторов, влияющих на точность формы и размеров конических поверхностей на станках с ЧПУ, и разработки модели точности с учётом этих факторов. Для оценки результатов обработки шероховатость поверхности измерялась контактным профилометром по параметру Ra , а отклонения формы и размеров конуса определялись методом координатных измерений вдоль образующей конуса. Методика включает математическое моделирование конической поверхности, учет погрешностей, возникающих при интерполяции траектории инструмента по осям X-Z, компенсацию радиуса режущей части, моделирование влияния геометрии и износа инструмента (VB, KT) на погрешности формы, а также включение в функцию погрешности упругих и термических деформаций станка. Модель проверялась на основе экспериментальной обработки и измерений при различных углах конуса.

Результаты исследования. В результате проведённого моделирования и экспериментальных измерений получены следующие результаты (табл. 1) [14].

1. Установлено, что погрешности интерполяции являются основным источником отклонений формы. При линейной интерполяции в системе ЧПУ вдоль образующей конуса наблюдаются отклонения в пределах 2-7 мкм. Эти отклонения приводят к изменению угла конуса в диапазоне $\pm 0,008^\circ$ - $0,02^\circ$.

2. Износ инструмента является фактором, оказывающим наибольшее влияние на качество поверхности. По мере увеличения износа задней поверхности инструмента значение параметра шероховатости Ra возрастает с 0,8 до 2,4 мкм, а волнистость вдоль образующей увеличивается до 3 мкм.

3. Термические деформации имеют существенное значение при обработке длинных конусов. Нагрев станка вызывает смещение между осями X-Z в пределах 5-12 мкм, что приводит к появлению погрешностей формы.

4. Применение твердосплавных инструментов обеспечивает стабилизацию качества поверхности. При чистовом проходе с использованием твердосплавных инструментов шероховатость поверхности удерживается в диапазоне $Ra = 0,8$ - $1,2$ мкм, тогда как при использовании инструментов из быстрорежущей стали данный показатель изменяется в пределах 1,6-2,8 мкм.

5. Неправильное применение компенсации радиуса вершины инструмента приводит к увеличению погрешностей формы. К геометрическим параметрам режущего инструмента относятся угол резания, задний угол, радиус при вершине (nose radius), точность радиуса вершины инструмента, а также соответствие профиля инструмента форме конической поверхности.

На рисунках 1, 2 представлены отклонения формы вдоль образующей конуса, шероховатость поверхности в зависимости от чистового прохода, а также отклонение угла конуса вдоль его образующей. На рисунке 1, а визуальное

показаны погрешности интерполяции, износ инструмента и термические деформации вдоль образующей конуса [14]. При этом по оси X отложено расстояние вдоль образующей конуса (мм), а по оси Y – величина отклонения (мкм). Различные цвета соответствуют ошибкам интерполяции, износу инструмента и термическим деформациям. На рисунке 2 по оси X представлена глубина резания (мм), а по оси Y – параметр шероховатости поверхности Ra (мкм).

Табл. 1. Представление результатов исследования в табличной форме [14]

Фактор	Измеряемый параметр	Ra (μm) при чистовом переходе	Отклонение формы (микрон)	Отклонение угла конуса ($^\circ$)
Ошибка интерполяции	Интерполяция по осям X-Z	0,8-1,2	2-7	$\pm 0,008-0,02$
Износ инструмента	Изменение заднего угла	1,0-2,4	3-6	$\pm 0,01-0,015$
Термическая деформация	Тепловая нагрузка станка	0,8-1,6	5-12	$\pm 0,01$
Упругая деформация	Изгибание длинной детали	0,9-1,3	3-5	$\pm 0,008$
Компенсация радиуса инструмента	Погрешность радиуса (R)	1,0-1,6	2-4	$\pm 0,015$

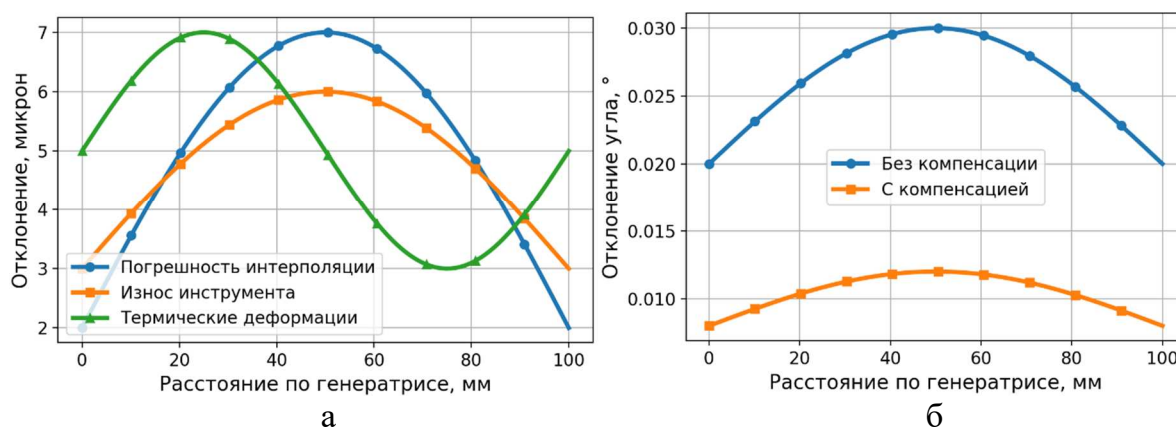


Рис. 1. Зависимости: а) отклонений формы конуса вдоль образующей конуса, б) отклонений угла конуса вдоль образующей конуса [15]

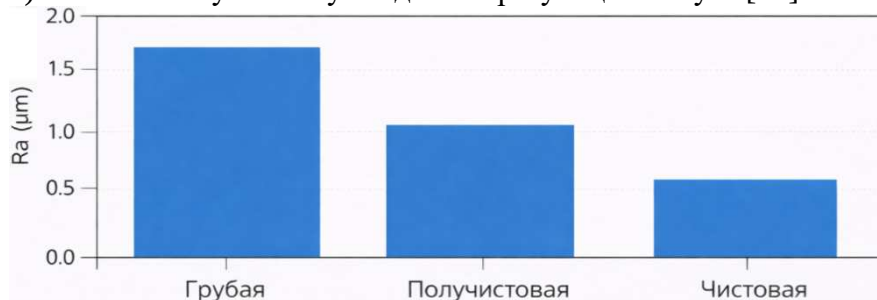


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности конуса (Ra) от проходов обработки [15]

Эти графики наглядно демонстрируют влияние станков с ЧПУ и выбора инструмента на качество конической поверхности и подтверждают точность модели.

Обсуждения

Полученные результаты показывают, что при обработке конических поверхностей на станках с ЧПУ точность в основном ограничивается износом

инструмента, погрешностями интерполяции и термическими деформациями. С увеличением износа изменяется реальная геометрия режущего инструмента, что вызывает отклонения формы вдоль образующей конуса [14]. Линейная интерполяция не полностью отражает реальную форму конуса, особенно при высоких скоростях, из-за чего погрешности увеличиваются, однако модель позволяет их компенсировать. Термические деформации изменяют размеры элементов станка, влияя на угол конуса. Кроме того, упругое изгибание длинных деталей снижает точность формы; при учёте этих воздействий в модели отклонения минимизируются. Механические свойства материала Сталь 45 и применение твердосплавного инструмента положительно сказываются на стабильности качества поверхности и надёжности результатов измерений.

Для расчёта точности обработки конических поверхностей на станках с ЧПУ по предложенной методике необходимо иметь экспериментальные данные. Если какая-либо часть этих данных известна, можно выполнять упрощённые расчёты. Это, в основном, касается вычисления погрешностей на основе геометрических погрешностей конической поверхности, параметров инструмента и точности станка. Например, допустим, что коническая поверхность нам известна. Большой радиус конуса $R_1 = 50$ мм, меньший радиус конуса $R_2 = 20$ мм, высота конуса $h = 100$ мм, угол конуса (полуконусный угол – это угол между осью конуса и его поверхностью) $\alpha = \arctan \frac{R_1 - R_2}{h}$. Обрабатываемый материал – алюминий, радиус кромки инструмента $r_c = 2$ мм. Параметры станка по осям следующие: $\delta_x = 0,01$ мм, $\delta_y = 0,01$ мм, $\delta_z = 0,015$ мм. Выполним расчёт с реальными значениями:

1. Рассчитаем параметр конической поверхности. Радиус конуса изменяется вдоль оси Z [14]:

$$R(z) = R_2 + (R_1 - R_2) \cdot \frac{z}{h} = 20 + (50 - 20) \cdot \frac{z}{100} = 20 + 0,3z; z \in [0, 100] \text{ мм.}$$

2. Радиус инструмента и погрешность профиля. Режущая часть инструмента имеет радиус (r_c), и при обработке конической поверхности этот радиус создает на поверхности небольшую профильную погрешность. Размер этой погрешности зависит от угла, под которым инструмент соприкасается с поверхностью. Приближённая формула для расчёта профильной погрешности принимается следующей [14]:

$$\delta_r = r_c \cdot (1 - \cos \varphi),$$

где φ – это угол, под которым радиус инструмента соприкасается с обрабатываемой поверхностью.

В худшем случае этот угол принимается равным 90° . Это соответствует ситуации, когда радиус инструмента создаёт максимальную профильную погрешность. Если $\varphi = 0^\circ$, то $\delta_r = 0$, то есть погрешность отсутствует. Если $\varphi = 90^\circ$, то $\delta_r = r_c$, то есть возникает максимальная погрешность. Таким образом, в нижней части конуса профильная погрешность больше, а в верхней части – меньше.

Проще говоря, φ здесь – это угол контакта инструмента с конической поверхностью, и принятие значения 90° является консервативным, то есть расчёт проводится для максимальной погрешности.

Далее эту приблизительную величину уменьшаем с учётом радиуса конуса для расчёта реального δ_r : Например, средний радиус $R_{cp} = (R_1 + R_2) / 2 = 35$ мм

$$\delta_r \approx \frac{r_c^2}{2R(z)} = \frac{2^2}{2 \cdot 35} \approx 0,057 \text{ мм.}$$

3. Рассчитаем влияние погрешностей станка. Погрешности по осям станка и погрешность вдоль оси Z (профиль) влияют на коническую поверхность. Общая погрешность:

$$\delta_{общая} = \sqrt{\delta_r^2 + \delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2} = \sqrt{0,057^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + 0,015^2} \approx 0,061 \text{ мм.}$$

Точность обработки этой конической поверхности составит примерно $\pm 0,061$ мм. Результат можно визуализировать графически вдоль оси Z. Для этого ось Z берём в диапазоне 0-100 мм с интервалом 10 мм и представляем данные как в виде графика (рис. 3), так и в виде таблицы (табл. 2) [15].

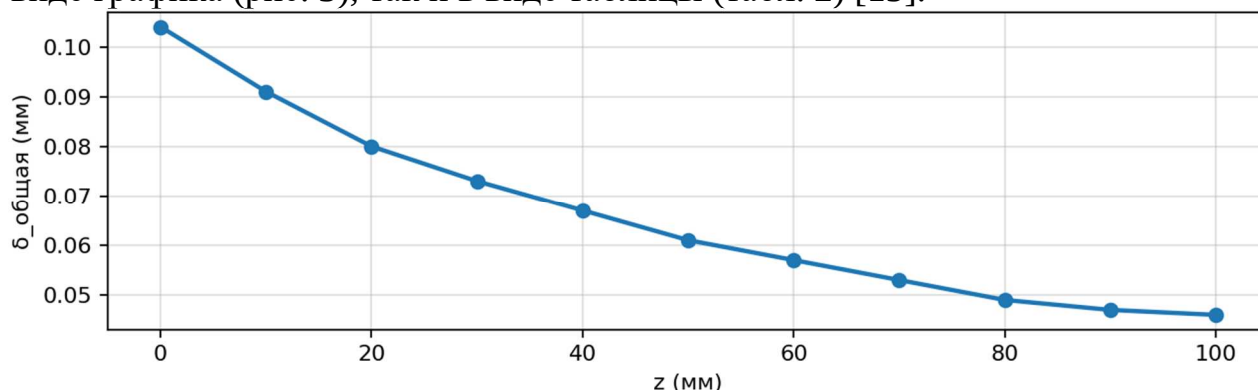


Рис. 3. Графическое представление погрешности конической поверхности вдоль оси Z [15]

Как видно на рисунке 3, слева сверху показан нижний конец конуса ($z = 0$), справа – верхний конец конуса ($z = 100$). Звёздочки (*) обозначают значение $\delta_{общая}$.

Табл. 2. Представление погрешности конической поверхности вдоль оси Z в табличной форме [15]

z, мм	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R(z), мм	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50
δ_r , мм	0,100	0,087	0,077	0,069	0,063	0,057	0,053	0,049	0,045	0,043	0,040
$\delta_{общая}$, мм	0,104	0,091	0,080	0,073	0,067	0,061	0,057	0,053	0,049	0,047	0,046

Как видно, нижняя часть конуса ($z = 0$) обрабатывается с наибольшей погрешностью, тогда как по направлению вверх точность увеличивается.

Технологические параметры, применяемые при обработке конической поверхности, и результаты измерений приведены в систематизированном виде в таблице 3.

В данной таблице приведены режимы резания, показатели шероховатости поверхности и точности формы для различных проходов обработки, выполненных на материале Сталь 45; таблица использована в качестве основы для последующего анализа. Как видно из таблицы 3, при чистовом проходе обработки Стали 45 твердосплавным инструментом шероховатость поверхности составила $Ra = 0,9-1,2$ мкм, а отклонения формы находились в интервале 2,6-3,2 мкм, что подтверждает практическую применимость предложенной модели точности.

Табл. 3. Лабораторные результаты по обработке конической поверхности

№ опыта	Вид перехода	t, мм	s, мм/об	v, м/мин	Инструмент	Ra, μm	Отклонение формы, μm	Отклонение угла конуса, °	Примечание
1	Грубый	1,8	0,28	140	Карбид (WC-Co)	4,6	9,5	$\pm 0,018$	Исходная форма
2	Грубый	1,5	0,25	160		4,1	8,2	$\pm 0,016$	Слабая вибрация
3	Получистовой	0,6	0,15	190		2,1	5,8	$\pm 0,012$	Стабильная обработка
4	Получистовой	0,5	0,12	210		1,8	4,9	$\pm 0,010$	Минимальный износ
5	Чистовой	0,18	0,08	230		1,2	3,2	$\pm 0,009$	Чистая поверхность
6	Чистовой	0,12	0,06	250		0,9	2,6	$\pm 0,008$	Оптимальный режим

Результат

В результате проведенного исследования была разработана модель точности для высокоточной обработки конических поверхностей на станках с ЧПУ и получены следующие выводы.

1. В качестве основных факторов, влияющих на точность конической поверхности, определены погрешности интерполяции, геометрия и износ инструмента, термические деформации и упругие отклонения.

2. Разработана математическая модель, учитывающая влияние указанных факторов.

3. Модель подтверждена экспериментально, при этом отклонение по образующей конуса находилось в диапазоне 2-10 микрон.

4. Для повышения качества поверхности наиболее эффективными методами определены чистовой проход, применение твердосплавного инструмента и контроль вибраций.

5. Установлено, что применение компенсационных механизмов в системе ЧПУ существенно повышает точность угла конуса.

6. Лабораторные измерения для материала Сталь 45 подтвердили практическую применимость предложенной модели точности.

В результате разработанная модель точности представляет собой эффективный подход к оптимизации обработки конических поверхностей на станках с ЧПУ, снижению размерных погрешностей и погрешностей формы, а также улучшению качества поверхности.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Науки Азербайджана – Грант № AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01.

Список литературы

1. Кошин А.А. Обработка на токарных станках: наладка, режимы резания: Справочник. – Челябинск: Сити-Принт, 2012. – 744 с

2. Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Обработка деталей на станках с ЧПУ: учебное пособие. – Минск: Новое знание, 2005. – 287 с.
3. Plusty J. Manufacturing processes and equipment. – Prentice Hall, 2000. – 928 p.
4. Богатенков С.А., Каширин Н.А., Кулиев М.А., Юсубов Н.Д. Машинная графика в САПР ТП: учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1994. – Ч. 3. – 47 с.
5. Юсубов Н.Д., Богатенков С.А. Оптимизация планов обработки поверхностей на токарных автоматах // Известия вузов. Машиностроение. – 1993. – №10-12. – С. 118-121.
6. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Matrix model of accuracy in machining conical surfaces on CNC lathes // Reliability: Theory and Applications. 2025, vol. 20, Special Issue No. 7(83), pp. 393-400.
7. Юсубов Н.Д. Повышение эффективности многоинструментной обработки на станках-автоматах токарной группы: автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Баку, 2009. – 41 с.
8. Юсубов Н.Д. Обобщение теории точности многоинструментной токарной обработки. – Баку: Эльм, – 2007. – 362 с.
9. Расулов Н.М. Технология машиностроения (Повышение эффективности обработки сложных поверхностей вращения). Учебное пособие для вузов. – Баку: Элм, – 1997. – 134 с.
10. Юсубов Н.Д. Матричные модели точности обработки в одноинструментной токарной обработке // Технология машиностроения. – 2009. – №1. – С. 41–45.
11. Юсубов Н.Д. Матричные модели точности в многоинструментальных двухсуппортных наладках // Вестник машиностроения. – 2009. – №3. – С. 52-54.
12. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Theoretical basis for the development of an algorithmic unified complex of mathematical models of cutting forces // Machine Science. 2023, no. 1, pp. 55-60.
13. Аббасова Г.М. Полнофакторная модель точности в многоинструментной двухсуппортной обработке // The Scientific Heritage. 2019, iss. 42-1(42), pp. 31-35.
14. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R., Salmanov I. On the matrix generalization of the theory of machining accuracy // Machine Science. 2022, vol. 11, no. 2, pp. 23-36.
15. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Modeling of machining accuracy of conical surfaces on CNC machine tools // Proceedings. 2025, vol. 2, pp. 59-67.

Сведения об авторах:

Юсубов Низами Дамир оглы – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»;

Аббасова Хейран Мюриюд кызы – д.ф.т.н., доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения»;

Дадашов Рамиль Енгибар оглы – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения»;

Гусейнов Юсиф Эльдар оглы – ассистент кафедры «Технология машиностроения».