

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.923

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-4-11

ДИНАМИКА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛИ ПРИ КРУГЛОМ ШЛИФОВАНИИ

Елизавета Натановна Каширская

РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия

liza.kashirskaya@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2108-8462>

Аннотация. Исследованы особенности динамики формообразования при круглом наружном шлифовании с учетом соотношения скоростей шлифовального круга и движения подачи абразивного инструмента. Выполнена оценка образующейся погрешности обработанной поверхности детали. Разработаны математические зависимости для расчета основных параметров формообразования. Проведен анализ влияния соотношения скоростей на динамику процесса шлифования. Полученные результаты позволяют прогнозировать качество обрабатываемой поверхности и оптимизировать режимы резания при круглом шлифовании.

Ключевые слова: круглое шлифование, производящие линии, формообразование поверхности, моделирование

Для цитирования: Каширская Е.Н. Динамика формообразования детали при круглом шлифовании // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 4-11. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-4-11.

Original article

Open Access Article

DYNAMICS OF PART FORM SHAPING DURING CYLINDRICAL GRINDING

Elizaveta N. Kashirskaya

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

liza.kashirskaya@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2108-8462>

Abstract. The paper studies the dynamics features of form shaping in external cylindrical grinding taking into account the speed ratio of the grinding wheel and the feed movement of the abrasive tool; assesses the resulting errors on the processed surface of the part. The work develops mathematical dependencies for calculating the main parameters of form shaping; analyses the influence of speed ratios on the dynamics of the grinding process. The obtained results allow predicting the quality of the machined surface and optimizing cutting modes during cylindrical grinding.

Keywords: cylindrical grinding, generating lines, surface form shaping, modelling

For citation: Kashirskaya E.N. Dynamics of Part Form Shaping During Cylindrical Grinding. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 4-11. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-4-11.

Введение

В современных условиях развития машиностроения особую актуальность приобретают вопросы повышения эффективности процессов механической обработки деталей. Среди различных методов финишной обработки особое место занимает круглое шлифование, которое обеспечивает высокую точность и качество поверхности готовых изделий.

Формообразование поверхности детали при круглом шлифовании представляет собой сложный физико-технологический процесс, где взаимодействуют множество факторов: геометрия и состояние абразивного инструмента, режимы резания, физико-механические свойства обрабатываемого материала, смазочно-охлаждающая жидкость и др. Понимание динамики этого процесса является ключевым для оптимизации режимов обработки и получения требуемых характеристик детали.

Актуальность исследования процесса формообразования заключается в возможности повышения эффективности процесса шлифования за счет оптимизации режимов обработки и улучшения качества готовых деталей. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании технологических процессов механической обработки и модернизации шлифовального оборудования.

Несмотря на значительное количество исследований в данной области, многие аспекты динамики формообразования при круглом шлифовании остаются недостаточно изученными. В частности, требуют дальнейшего исследования закономерности образования геометрии поверхности заготовки.

Целью данной работы является комплексное исследование формообразования поверхности детали при круглом шлифовании с учетом взаимосвязанных факторов процесса и разработка рекомендаций по оптимизации режимов резания. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать существующие теоретические и экспериментальные исследования, разработать методику исследования динамики процесса, формообразования поверхности детали при круглом шлифовании и сделать обоснованное научное заключение об оптимизации процесса шлифования на основе выбора режимов резания.

Методика исследования формирования поверхности детали

Идеализированное представление о круглом шлифовании предполагает образование в результате обработки поверхности прямого кругового цилиндра. Однако наличие тепловых и упругих деформаций технологической системы, возмущений от неуравновешенности, погрешностей формы и эксцентричности вращающихся частей станка приводят к колебаниям текущего радиуса заготовки или шлифовального круга. Это вызывает искажение идеального процесса формообразования поверхности детали, ведущее к возникновению погрешности вследствие изменения мгновенного положения линии контакта шлифовального круга и заготовки. Таким образом, возникают колебания инструмента относительно заготовки, влияющие на истинный характер формообразования поверхности детали.

Характер процесса формообразования детали определяется соотношением между параметрами режима резания и параметрами относительных колебаний инструмента и заготовки [1, 2].

Особый интерес представляет исследование высокоскоростного шлифования, осуществляемого при скоростях резания $V = 60...250$ м/с и при скорости подачи V_s , изменяющейся от 750 мм/мин до 250 м/с. Отношение этих скоростей q составляет огромный диапазон:

$$q = \frac{V}{V_s} = 0,2 \dots 20000.$$

Образование цилиндрической поверхности при круглом шлифовании можно рассматривать двояко. Традиционный подход вытекает из классического определения цилиндрической поверхности, как формирующейся прямолинейной образующей при ее параллельном самой себе движении по круговой направляющей. Это справедливо при врезном шлифовании. Но если мы будем рассматривать динамику формообразования при продольном шлифовании, то нам придется переформулировать определение цилиндрической поверхности,

как формирующейся при движении круговой образующей вдоль прямолинейной направляющей.

Процесс формообразования поверхности детали в идеальном случае не искажается. Цилиндрическая поверхность, в силу обратимости производящих линий, формируется движением прямолинейной образующей по круговой направляющей или движением круговой образующей по прямолинейной направляющей (рис. 1).

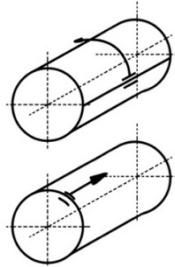


Рис. 1. Идеализированное формообразование
Fig. 1. Idealized shaping

Если производящая линия не имеет искажений, то и поверхность детали получается неискаженной. Такой подход является идеализированным и не позволяет оценить характер и величину возможных погрешностей обработки.

Исследованием динамики формообразования и ее влиянием на точность изделия занимаются многие ученые. Работы [3, 4] посвящены конкретно исследованию точности процесса круглого шлифования. Авторы статьи [5] включили в рассмотрение учет колебаний металлорежущего станка, перейдя, таким образом, из статической постановки задачи исследования к динамической. Учет колебательного процесса приближает исследователя к возможности прогнозирования погрешностей обработки. Общим вопросам моделирования процесса шлифования посвящена статья [6]. Данные работы представляют собой фундаментальную базу для дальнейшего развития теории и практики шлифования, а также могут быть использованы при разработке новых технологических процессов и модернизации существующего оборудования.

В настоящей работе используется принципиально иной подход – рассмотрение образования отклонений от точности на основе учета относительных колебаний инструмента и заготовки.

Формирование поперечной погрешности детали

Круговая производящая линия поверхности детали формируется в течение одного оборота заготовки за время:

$$\tau = \frac{1}{n}, \text{ с},$$

где n – частота вращения заготовки, Гц.

Колебания шлифовального круга относительно заготовки, период которых больше времени формирования круговой производящей линии, не могут привести к её искажению, так как период колебаний связан с частотой колебаний соотношением:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ с},$$

где ω – частота относительных колебаний шлифовального круга и заготовки, с^{-1} , а диапазон частот колебаний, не искажающих поперечную геометрию детали, выражается неравенством $\omega < 2\pi n$.

Значение скорости круговой подачи заготовки выражается зависимостью: $V_{S_{kp}} = 2\pi lr$, м/с, где r – радиус заготовки, м, поэтому условие неискажения поперечного профиля детали принимает вид $q < \frac{V}{\omega r}$ и является тем значением отношения скорости резания к скорости круговой подачи, к которому нужно стремиться, назначая режимы резания. Оно зависит от радиуса обрабатываемой заготовки и от частоты её колебаний относительно шлифовального круга. Работа с таким отношением скоростей, позволяющим получать неискажённый профиль поперечного сечения детали, не всегда возможна, поэтому имеет смысл рассмотреть возникновение и развитие поперечных погрешностей при больших значениях q .

При частотах относительных колебаний $\omega \geq 2\pi n$ возникает и растет овальность поперечного профиля детали, достигая своего максимума – удвоенной амплитуды колебаний – при $\omega = 4\pi n$, так как именно при этой частоте период колебаний становится вдвое меньше времени формирования круговой образующей линии. Таким образом, овальность формируется в диапазоне $2\pi n \leq \omega < 4\pi n$, что соответствует изменению отношения скоростей в пределах:

$$\frac{V}{\omega r} \leq q < \frac{2V}{\omega r}.$$

В этом диапазоне величина поперечной погрешности $\Delta_{\text{поп}}$, вызванной наложением на поперечный профиль заготовки синусоидальной колебательной волны, носит синусоидальный характер и определяется из следующих условий:

$$\begin{aligned} \text{при } q = \frac{V}{\omega r}, \quad \Delta_{\text{поп}} &= 0, \\ \text{при } q = \frac{2V}{\omega r}, \quad \Delta_{\text{поп}} &= \Delta_{\text{max}} = 2A, \text{ мкм}, \end{aligned}$$

где A – амплитуда относительных колебаний, мкм.

Отсюда выводится зависимость для величины поперечной погрешности детали:

$$\Delta_{\text{поп}} = 2A \sin \frac{\pi}{2} \left(\frac{\omega r}{V} q - 1 \right).$$

При частотах колебаний $4\pi n \leq \omega < 30\pi n$ развивается огранка (до пятнадцати волн по окружности), величина которой равна удвоенной амплитуде колебаний. Этот диапазон соответствует изменению отношения скоростей в границах $\frac{2V}{\omega r} \leq q < \frac{15V}{\omega r}$.

Погрешности поперечной геометрии, имеющие более пятнадцати волн по длине окружности, относятся к разряду волнистости и наблюдаются при $q \geq \frac{15V}{\omega r}$.

При дальнейшем увеличении отношения скоростей q начинает действовать известный механизм самоперерезания волн на поверхности детали, приводящий к уменьшению погрешности обработки. Это явление наблюдается, когда кривизна траектории относительных колебаний инструмента и заготовки превышает кривизну зоны резания, равную сумме кривизны шлифовального круга и заготовки. Отсюда выводится значение q , при котором начинается самоперерезание волн: $q = \frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$. Вычислительный эксперимент дал приближенную зависимость для величины погрешности в этом диапазоне скоростей $\Delta_{\text{поп}} = 2A \sin^2 \frac{\pi V}{2\omega q} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$, которая расходится с реальными экспериментальными данными не более, чем на 2 % [1].

Проведённое исследование позволяет описать характеристику образования погрешностей поперечной геометрии детали посредством построения динамической характеристики процесса.

1. При соотношении скоростей главного движения резания (линейной скорости вращения круга) и движения подачи от $q = \frac{V}{V_s} = 0$ до $q = \frac{V}{\omega r}$ погрешность отсутствует, но может формироваться эксцентризитет поперечного сечения детали. При этом значение поперечной погрешности $\Delta_{\text{поп}} = 0$.

2. При $\frac{V}{\omega r} < q < \frac{2V}{\omega r}$ образуется овальность, а величина поперечной погрешности определяется зависимостью $\Delta_{\text{поп}} = 2A \sin \frac{\pi}{2} \left(\frac{\omega r}{V} q - 1 \right)$.

3. При $\frac{2V}{\omega r} < q < \frac{15V}{\omega r}$ образуется отклонение формы в виде огранки, а величина поперечной погрешности достигает своего максимума: $\Delta_{\text{поп}} = 2A$.

4. Дальнейший рост отношения частот в диапазоне $\frac{15V}{\omega r} < q < \frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$ вызывает волнистость на обработанной поверхности с прежней величиной $\Delta_{\text{поп}} = 2A$.

5. И, наконец, при неограниченном росте соотношения часто $\frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}} < q < \infty$ волнистость уменьшается вследствие самоперерезания волн и может быть рассчитана по формуле $\Delta_{\text{поп}} = 2A \sin^2 \frac{\pi V}{2\omega q} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$.

Формирование продольной погрешности детали при круглом шлифовании с продольной подачей

Прямолинейная производящая линия поверхности детали формируется в течение обработки поверхности заготовки за время $T = \frac{L+H}{V_{S\text{пр}}}$, с, где L – длина обрабатываемой поверхности заготовки, мм, H – ширина шлифовального круга, мм, $V_{S\text{пр}}$ – скорость продольной подачи, мм/с.

При соотношении периода относительных колебаний шлифовального круга и заготовки и времени формирования прямолинейной производящей линии $\frac{T}{\tau} \geq 4$ вдоль длины обрабатываемой поверхности за время τ проходит не более четверти волны колебаний, что приводит к формированию конусообразности при $\frac{2\pi}{\omega} \geq 4\tau$, т.е. при значении отношения скоростей:

$$q < \frac{\pi V}{2\omega(L+H)}.$$

Наложение синусоидальной волны колебаний на продольный профиль заготовки приводит к образованию синусоидальной же погрешности, которая находится из условий:

$$\begin{aligned} &\text{при } q = 0; \Delta_{\text{пр}} = 0, \\ &\text{при } q = \frac{\pi V}{2\omega(L+H)}; \Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{max}} = 2A, \text{ мкм}, \\ &\text{откуда } \Delta_{\text{пр}} = 2A \sin \frac{\omega(L+H)}{V} q. \end{aligned}$$

Относительные колебания, при которых вдоль длины заготовки укладывается от четверти до половины волны, приводят к образованию седлообразности или бочкообразности. Это происходит при соотношениях скорости главного движения резания и скорости подачи, лежащем в диапазоне:

$$\frac{\pi V}{2\omega} (L+H) \leq q \leq \frac{\pi V}{\omega} (L+H).$$

При $q \geq \frac{\pi(L+H)}{\omega}$ формируется волнистость продольного профиля.

С дальнейшим увеличением отношения скоростей при $q \geq \frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$ явление самоперерезания волн приводит к уменьшению величины волнистости.

На основании полученных результатов строится характеристика образования продольной погрешности для данного вида шлифования.

1. При $0 < q < \frac{\pi V}{2\omega(L+H)}$ появляется конусообразность, и значение продольной погрешности выражается зависимостью $\Delta_{\text{пр}} = 2A \sin \frac{\pi(L+H)}{V}$.

2. В диапазоне $\frac{\pi V}{2\omega(L+H)} < q < \frac{\pi V}{\omega(L+H)}$ появляется бочкообразность или седлообразность с величиной погрешности $\Delta_{\text{пр}} = 2A$.

3. При $\frac{\pi V}{\omega(L+H)} < q < \frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$ образуется волнистость с размахом волны $2A$.

4. При $\frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}} < q < \infty$ самоперерезание волн приводит к уменьшению погрешности $\Delta_{\text{пр}} = 2A \sin^2 \frac{\pi V}{2\omega q} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$.

Формирование продольной погрешности при врезном шлифовании

Если колебания шлифовального круга относительно заготовки позволяют вдоль длины обрабатываемой поверхности уложиться не более четверти волны, то, как уже было сказано, формируется конусообразность. При круглом врезном шлифовании это явление может наблюдаться, если частота колебаний не будет превышать четверти частоты вращения заготовки $\omega < \frac{\pi n}{2}$, т.е. при $q < \frac{V}{4\omega r}$.

При этом зависимость величины погрешности определяется из следующих условий:

при $q = 0$; $\Delta_{\text{пр}} = 0$,

при $q = \frac{V}{4\omega r}$; $\Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{max}} = 2A$, мкм,

и выражается зависимостью $\Delta_{\text{пр}} = 2A \sin \frac{2\pi\omega r}{V} q$.

При колебаниях с меньшими длинами волн, когда вдоль длины заготовки укладывается от четверти до половины волны, на поверхности детали будут появляться отклонения формы типа бочкообразности. Это явление наблюдается при $\frac{V}{4\omega r} \leq q < \frac{V}{2\omega r}$.

При $q > \frac{V}{2\omega r}$, вследствие невозможности образования волнистости продольного профиля при врезном шлифовании, наблюдаются отклонения формы, называемые двусторонней конусообразностью, когда знаки наклона соседних фрагментов обрабатываемой поверхности различны. Характеристика процесса образования продольной погрешности для данного вида шлифования описывается на основании проведенных исследований.

1. При $0 < q < \frac{V}{4\omega r}$ наблюдается конусообразность с величиной погрешности $\Delta_{\text{пр}} = 2A \sin \frac{2\pi\omega r}{V} q$.

2. При $\frac{V}{4\omega r} < q < \frac{V}{2\omega r}$ конусообразность переходит в бочкообразность с погрешностью $\Delta_{\text{пр}} = 2A$.

3. В диапазоне $\frac{V}{2\omega r} < q < \frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$ возникает двусторонняя конусообразность с величиной погрешности $\Delta_{\text{пр}} = 2A$.

4. При $\frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}} < q < \infty$ двусторонняя конусообразность с самоперерезанием волн приводит к уменьшению погрешности: $\Delta_{\text{пр}} = 2A \sin^2 \frac{\pi V}{2\omega q} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$.

Проведённые исследования объясняют изменение погрешности формы детали с изменением отношения скорости резания и скорости подачи при круглом шлифовании.

В качестве примера рассмотрим шлифование цилиндрической детали радиуса $r = 10$ мм и длины $L = 1250$ мм шлифовальным кругом, имеющим радиус $R = 200$ мм и ширину $H = 80$ мм. Скорость резания $V = 73$ м/с. Предположим, что неустранимый дисбаланс шлифовального круга вызывает колебания с амплитудой $A = 1$ мкм. Характеристика шлифования для данного примера сведена в табл. 1.

Таблица 1

Динамическая характеристика образования погрешностей цилиндрической детали

Table 1

Dynamic characteristics of the formation of errors of a cylindrical part

Геометрия	Отношение скорости главного движения резания к скорости подачи q		Погрешность	
Отношение скоростей q	Начало диапазона	Конец диапазона	Вид погрешности	Значение погрешности $\Delta_{\text{пр}}$
Продольная	0	0,24	Конусообразность	$2 \sin 6,65q$
	0,24	0,48	Бочкообразность, седлообразность	$2A$
	0,48	2050	Волнистость	$2A$
	2050	∞	Волнистость с самоперерезанием волн	$2 \sin^2 (3220/q)$
Поперечная	0	20	Погрешность отсутствует, может формироваться эксцентрикитет	0
	20	40	Овальность	$2 \sin(0,08q-1,57)$
	40	300	Огранка	$2A$
	300	2050	Волнистость	$2A$
	2050	∞	Волнистость с самоперерезанием волн	$2 \sin^2 (3220/q)$

При обычной скорости продольной подачи $V_{\text{спр}} = 40$ м/мин получаем $q = 109$ и из табл. 1 находим, что продольный профиль имеет волнистость $\Delta_{\text{пр}} = 2$ мкм, а поперечный профиль – огранку $\Delta_{\text{поп}} = 2$ мкм. Уменьшением скорости продольной подачи можно добиться перемещения работы в область самоперерезания волн, и тогда, например, при $V_{\text{спр}} = 1200$ мм/мин получим $q = 3650$, а волнистость как в продольном, так и в поперечном сечении уменьшится до величины:

$$\Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{поп}} = 2A \sin^2 \frac{\pi V}{2\omega q} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}} = 1,2 \text{ мкм.}$$

Приведённый пример показывает, что выбор наилучшего сочетания скоростей резания и подачи может быть сделан лишь на основе решения оптимизационной задачи, рассматривающей изменение точности шлифования как функцию параметров режима резания и динамических факторов, действующих на процесс обработки заготовки.

Заключение

Все возмущения, действующие на процесс круглого шлифования, в конечном итоге сводятся к незапланированным в технологическом процессе смещениям шлифовального круга относительно заготовки. Эти смещения имеют вибрационные составляющие, каждая из которых определяет погрешности формы и размера обработанной детали. Данное исследование показало, что образующиеся на поверхности детали погрешности не копируют относительные колебания инструмента и заготовки, а являются следствием искажения формообразующих линий, вызванных этими колебаниями. Такое представление формообразования позволило установить связь параметров точности и параметров вибросмещений инструмента относительно заготовки, что, в свою очередь, дает возможность назначать оптимальные режимы резания, способствующие уменьшению погрешности и повышению точности.

Список источников:

1. Каширская Е.Н. Повышение производительности и точности круглого шлифования на основе диагностики процесса: Дисс. ... к.т.н. по спец. 05.02.08. М.: МГУПИ, 1987. – 224 с.
2. Каширская Е.Н. Повышение точности круглого шлифования на основе моделирования процесса формообразования // Науч. Труды ОрелГПИ. – Орел. – 1996. – Т. 8.
3. Ломова О.С., Сорокина И.А. Исследование точности процесса круглого шлифования имитационным моделированием. // Омский научный вестник. – 2013.
4. Ломова О.С., Ломов С.М., Моргунов А.П. Точность обработки деталей на круглошлифовальных станках: монография. – 2011.
5. Кохликян С.А., Баласанян Б.С. О некоторых особенностях колебаний круглошлифовального станка. – 2008.
6. Евтухов В.Г. и др. Моделирование процесса круглого врезного шлифования // Вестник СумДУ. – 2009.

Информация об авторе:

Каширская Елизавета Натановна

Кандидат технических наук, доцент РТУ МИРЭА, AuthorID 467287, ORCID ID: 0000-0003-2108-8462

References:

1. Kashirskaya E.N. Increasing the Productivity and Accuracy of Cylindrical Grinding Based on Process Diagnostics. Candidate of Technical Sciences Dissertation. Moscow: Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science; 1987.
2. Kashirskaya EN. Increasing the Accuracy of Cylindrical Grinding Based on Simulating the Shaping Process. In: Proceedings of Orel State Pedagogical University. Orel: 1996; vol. 8.
3. Lomova O.S., Sorokina I.A. The Investigation of Precision Cylindrical Grinding Simulation Modelling. Omsk Scientific Bulletin; 2013.
4. Lomova O.S., Lomov S.M., Morgunov A.P. Precision Machining for Cylindrical Grinding Machines; 2011.
5. Kokhlikyan S.A., Balasanyan B.S. On Some Peculiarities of Vibrations of a Cylindrical Grinding Machine; 2008.
6. Evtukhov VG, et al. Simulating the Process of Cylindrical Plunge Grinding. Bulletin of SumDU. 2009.

Information about the author:

Kashirskaya Elizaveta Natanovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at MIREA – Russian Technological University, AuthorID 467287, ORCID ID: 0000-0003-2108-8462

Информация об авторе:

Каширская Елизавета Натановна

Кандидат технических наук, доцент РТУ МИРЭА, AuthorID 467287, ORCID ID: 0000-0003-2108-8462

Information about author:

Kashirskaya Elizaveta Natanovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of RTU MIREA, AuthorID 467287, <http://orcid.org/0000-0003-2108-8462>

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 24.04.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 25.03.2025; approved after reviewing 24.04.2025; accepted for publication 19.05.2025.

Рецензент – Медведев Д.М., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Medvedev D.M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.