

Точность геометрической формы отверстия в продольном сечении при хонинговании

© 2024

Денисенко Александр Федорович^{*1}, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»

*Гришин Роман Георгиевич*², кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»

*Антипова Евгения Дмитриевна*³, аспирант кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» Самарский государственный технический университет, Самара (Россия)

*E-mail: tmsi@samgtu.ru,
sammortor@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6393-2831>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4511-9147>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1759-7080>

Поступила в редакцию 29.02.2024

Принята к публикации 16.07.2024

Аннотация: Широкое применение хонингования в качестве финишной обработки внутренних цилиндрических поверхностей для цилиндропоршневых систем, используемых в ряде конструкций, обусловлено высокой точностью, измеряемой десятками долями микрометра, и высокой производительностью процесса. Важнейшим показателем надежной работы цилиндропоршневых систем являются высокие требования к геометрической точности отверстий. В связи с отсутствием достаточных теоретических обоснований выбора параметров хонингования, обеспечивающих точность геометрической формы отверстия в продольном сечении, была предложена модель образования погрешностей геометрической формы отверстия, построенная на учете кинематических характеристик процесса, включающих соотношение размеров хонинговального бруска, длины отверстия, хода хонинговальной головки, соотношения скоростей поступательного и вращательного движений и силового воздействия в зоне обработки, которое изменялось за счет наличия перебега хонинговального бруска. Для получения аналитических зависимостей, обеспечивающих минимизацию отклонений формы, были рассмотрены условия съема припуска для точек обрабатываемой поверхности, величина которого принималась пропорциональной пути перемещения и величине давления. С этой целью были построены графики функций распределения перемещений и изменения давлений в зависимости от координаты расположения точки на образующей обрабатываемого отверстия. В результате использования полученных аналитических зависимостей установлено потенциальное появление погрешности формы в виде седлообразности, доминирующим фактором влияния на значение которой является величина перебега хонинговального бруска. Вместе с тем показано, что соотношение скоростей поступательного и вращательного движений несущественно влияет на нарушение формы в продольном сечении.

Ключевые слова: хонингование; геометрическая точность отверстий; кинематические характеристики хонингования; величина перебега; функция распределения перемещений.

Для цитирования: Денисенко А.Ф., Гришин Р.Г., Антипова Е.Д. Точность геометрической формы отверстия в продольном сечении при хонинговании // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 3. С. 53–62. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-3-69-5.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы хонингование находится на подъеме, что связано с необходимостью улучшения трибологических характеристик цилиндропоршневых систем, используемых в подъемно-транспортных машинах, гидравлических домкратах, компонентах двигателей и робототехнике. В технологии производственного процесса методы абразивной обработки всегда были важной областью исследований с точки зрения разработки и моделирования, поскольку они определяют характеристики качества поверхности обрабатываемой детали. Хонингование – процесс абразивной обработки, чаще всего используемый при черновой, полустачковой и чистовой обработке цилиндрических отверстий для получения деталей с высоким качеством обработанной поверхности и минимальными геометрическими погрешностями [1–3]. Особенностью хонингования являются попеременные царапины, нанесенные на поверхность двумя

движениями инструмента. Эти попеременные царапины придают поверхности особые эксплуатационные характеристики с точки зрения удержания и циркуляции масла. Поэтому обычно хонингование используется для того, чтобы поверхность элементов, которые находятся в контакте с другими в процессе относительного движения, как, например, в системе «поршень – цилиндр», соответствовала требованиям к геометрической и размерной точности и текстуре [4–6]. Одной из ключевых задач, которую необходимо решать в процессе хонингования, является обеспечение характерной текстуры поверхности, состоящей из сетки масляных царапин, образующих перекрестную штриховку, а также необходимых значений параметров профиля шероховатости [1; 2; 7].

За время использования процессов хонингования было выполнено много исследований, посвященных как традиционному, так и нетрадиционному хонингованию. Так, например, в работе [8] отмечаются положительные

результаты процесса обработки с переменными кинематическими параметрами и указывается, что хонингование, выполняемое с переменными параметрами кинематики, влияет на значение получаемых параметров профиля шероховатости, что является дополнительным стимулом, влияющим на дальнейшее развитие станков с ЧПУ, используемых для хонингования.

По данным, приведенным в [9; 10], процесс хонингования характеризуется тремя перекрывающимися движениями хонинговального инструмента: вращением вокруг оси инструмента, линейным возвратно-поступательным движением и движением подачи хонинговального бруска в радиальном направлении. Основные параметры, определяющие кинематику хонингования: осевая линейная скорость хонинговальной головки при возвратно-поступательном движении V_{Π} , м/мин, и окружная скорость хонинговальной головки $V_{\text{В}}$, м/мин:

$$V_{\Pi} = 2l_{\text{Х}} n_{\Pi}; V_{\text{В}} = 0,001\pi Dn, \quad (1)$$

где $l_{\text{Х}}$ – длина хода хонинговальной головки при возвратно-поступательном движении, м;

n_{Π} – частота хода хонинговальной головки при возвратно-поступательном движении, 1/мин;

n – частота вращения хонинговальной головки, об/мин;

D – диаметр хонингуемого отверстия, мм.

Указанные скорости определяют скорость резания V и угол хонингования α :

$$V = \sqrt{V_{\Pi}^2 + V_{\text{В}}^2}; \operatorname{tg} \alpha = V_{\text{В}}/V_{\Pi}. \quad (2)$$

Радиальное движение хонинговального бруска может управляться либо подачей, либо усилием. При хонинговании с регулируемой подачей хонинговальный брусок подается наружу определенными этапами и через определенные промежутки времени с помощью различных механизмов, например с помощью оправки с коническими элементами. При хонинговании с контролируемым усилием высота шагов подачи зависит от разницы между требуемыми и измеренными технологическими силами, что приводит к различным технологическим усилиям во время процесса хонингования [9]. При обработке, проводимой с постоянной силой хонингования, качество хонингованных отверстий может повыситься [11].

Одной из основных целей процесса хонингования является уменьшение отклонения формы хонингованных отверстий. В работе [12] на основе сравнения отклонений формы отверстия, которые можно получить при определенных видах обработки, сделан вывод, что процесс хонингования значительно улучшает цилиндричность обрабатываемого отверстия по сравнению с другими методами изготовления. Авторы работы [13] отметили, что цилиндричность отверстия цилиндра определяется в первую очередь шестью группами факторов, такими как жесткость станка и приспособления, конструкция хонинговальной головки, расположение хонинговальных брусков, свойства обрабатываемого материала, параметры процесса хонингования и заранее созданная исходная цилиндричность хонингованного отверстия в ходе ранее проведенной обработки.

В работе [14] рассмотрено влияние скорости хонинговального бруска на получение отверстий с минималь-

ными геометрическими погрешностями. Однако автор ограничивается исследованием точности отверстия только в поперечном сечении, не рассматривая ее влияние на точность в продольном направлении. Автор работы [15] описал влияние изменения скорости возвратно-поступательного движения и скорости вращения на улучшение овальности и заметил, что при постоянном перебегае наблюдалось снижение овальности с увеличением значения скорости возвратно-поступательного движения. Максимальная овальность наблюдалась при более высокой скорости возвратно-поступательного движения и при относительно более низкой скорости вращения. При более высокой скорости вращения хонинговальной головки овальность снижается для всех значений скорости возвратно-поступательного движения [15]. В [16] подтверждено влияние осевого ускорения движения хонинговальной головки на цилиндрическое отклонение. Установлено, что при ускорении величиной $<1 g$ и при ускорении величиной $>2 g$ получены большие отклонения цилиндричности хонингованного отверстия, чем при обработке, проводимой с величиной ускорения $1,5 g$ (g – гравитационное значение ускорения).

Как следует из приведенного обзора, в опубликованных работах достаточно подробно изучалось получение хонингованных отверстий с минимальными отклонениями цилиндрической формы. Вместе с тем в немногочисленных опубликованных работах по обеспечению формы отверстия в продольном сечении, например [17–19], имеются рекомендации по выбору параметров хонингования, в частности величины перебега, не содержащие достаточных теоретических обоснований, а строящиеся лишь на основе ряда экспериментальных данных, ценность которых существенно зависит от конкретных условий хонингования.

Анализ работ, посвященных процессу хонингования, позволил выделить основные параметры, влияющие на точность геометрической формы отверстия: размеры хонинговальных брусков, соотношения скоростей вращательного и возвратно-поступательного движений хонинговальной головки и рациональный выбор давления в зоне контакта брусков с деталью.

В работе [19] отмечается, что для получения правильной геометрической формы обрабатываемого отверстия бруски должны выходить из отверстия на некоторую величину, называемую перебегом. Однако подчеркивается, что при неправильно выбранном симметричном перебеге в отверстии может быть получена седлообразность или бочкообразность. При этом делается вывод о том, что если считать доминирующей причиной перераспределения контактных радиальных усилий, то при любых значениях перебегов неизбежно должна формироваться погрешность формы в продольном сечении в виде седлообразности, которая по мере увеличения величин перебега возрастает. При этом автор считает оптимальным значение перебега l' , определяемого соотношением

$$l' = (0,33 \dots 0,25)l = \operatorname{opt}, \quad (3)$$

где длина бруска l определяется выражениями

$$l = (1,2 \dots 0,8)L \text{ и } l = \frac{1,5 \pi D \operatorname{tg} \alpha}{z}, \quad (4)$$

где L и D – длина и диаметр хонингуемого отверстия соответственно;
 z – количество брусков:

$$z = (0,25 \dots 0,35) \frac{\pi D}{b}, \quad (5)$$

где α – угол подъема траектории движения режущих инструментов;
 b – ширина бруска.

В указанный в работе [19] диапазон изменения величин перебегов укладываются значения, предлагаемые в работах [18; 20], однако без четких обоснований их выбора.

Цель исследования – разработка рекомендаций, основанных на моделировании реальных циклов хонингования, которые помогут конечным пользователям во время настройки процесса обработки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формирование погрешностей геометрической формы при хонинговании может быть проведено только на модели резания, учитывающей локальные контакты между заготовкой и абразивным инструментом, изменяющиеся вследствие воздействия кинематического и силового факторов.

Для получения аналитических зависимостей, обеспечивающих минимизацию отклонений формы, необходимо рассмотреть условия съема металла при вращательном и возвратно-поступательном движении хонинговальной головки. Указанную задачу можно решить, принимая, что величина съема металла U пропорциональна величине перемещения отдельных точек бруска относительно выбранной точки обрабатываемой поверхности S и величине давления p :

$$U = k p S, \quad (6)$$

где k – коэффициент удельного съема материала при данных условиях хонингования.

Для определения формы обрабатываемого отверстия в продольном направлении обозначим через $U(x)$ съем металла в точке x по длине отверстия (рис. 1). Давление в зоне контакта брусков с деталью может зависеть как от положения брусков относительно детали, т. е. являться функцией координаты x на обрабатываемой поверхности (рис. 1), так и от положения рассматриваемой точки на линии контакта бруска, т. е. являться функцией координаты x^* в подвижной системе координат, связанной с хонинговальной головкой:

$$p = p(x, x^*).$$

В дальнейших выкладках будем считать, что давление $p=p(x, x^*)$ не зависит от координаты x^* , а только от координаты x на обрабатываемой поверхности, т. е. $p=p(x)$.

Направление скорости вращательного движения V_B во время цикла обработки не изменяется, а направление скорости поступательного движения V_{Π} изменяется в конце каждого хода головки. В крайних положениях происходит снижение величины скорости поступательного движения до нуля, а затем возрастание от нуля

до V_{Π} в обратном направлении, в результате чего возникает задержка хода на некоторое время.

Такой характер движений головки приводит к неравенству пути перемещения отдельных точек режущей поверхности брусков относительно обрабатываемой поверхности. Для того чтобы учесть, какая доля общего пути трения приходится на отдельные участки поверхности детали и рабочей поверхности брусков, в работе [20] предложено ввести функцию распределения перемещений $\alpha(x)$ в продольном направлении и функцию распределения перемещений $\beta(x)$ в результате вращения головки.

На рис. 2, 3 представлены функции распределения для двух возможных условий симметричного хонингования (при одинаковых условиях обработки торцов отверстия). Для случая, изображенного на рис. 2, когда значение перебега $l'=0$, длина хода головки определяется как

$$l_x = L - l.$$

Для крайних участков, длина которых равна l , ординаты кривой распределения продольного перемещения изменяются по линейному закону, а ординаты для среднего участка длиной $(L-2l)$ остаются постоянными и определяются из условия нормировки, в соответствии с которым площадь, ограниченная кривой распределения и осью абсцисс, равна единице:

$$\alpha_{\max} l + \alpha_{\max} (L - 2l) = 1; \quad (7)$$

$$\alpha_{\max} = 1/(L - l). \quad (8)$$

Для кривой распределения перемещений при относительном повороте $\beta(x)$ характерно постоянство ординат для каждого участка, хотя их величины и отличаются друг от друга. Это отличие определяется характером изменения скорости продольного перемещения головки в конце продольного хода и временем, затраченным на изменение направления движения головки. Продолжительность задержки хода зависит от инерционности системы регулирования.

На рис. 3 изображен случай, для которого соблюдается соотношение

$$L - l < l_x < L + l.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При перемещении головки часть бруска выходит из отверстия в обоих направлениях, и над крайними точками образующей отверстия детали проходит только часть режущей поверхности брусков. Кривая продольного перемещения для крайних участков представляет собой трапецию. Для среднего участка длиной $(l_x - l)$ характерно постоянство ординат, величины которых определяются из условия нормировки:

$$(L + 2l' - 2l) \alpha_{\max} + 2 \frac{\alpha_{\max} + \alpha(0)}{2} (l - l') = 1, \quad (9)$$

где $\alpha(0) = \alpha_{\max} l' / l$.

Отсюда

$$\alpha_{\max} = \frac{l}{Ll - (l - l')^2}. \quad (10)$$

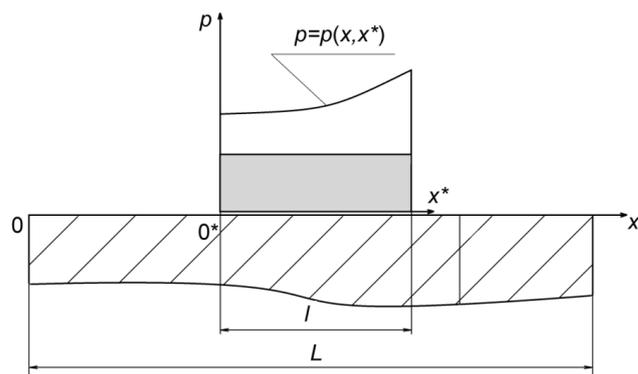


Рис. 1. Расчетная схема для определения съема металла при хонинговании
Fig. 1. Computational scheme for determining metal removal during honing

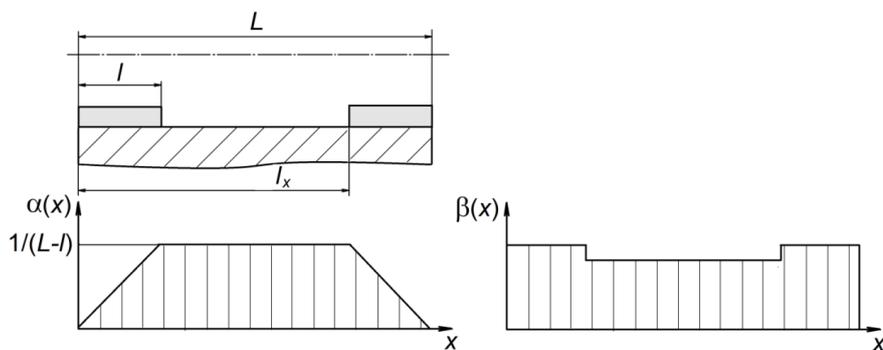


Рис. 2. Кривые распределения перемещений $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ при хонинговании при отсутствии перебега ($l' = 0$)
Fig. 2. Distribution curves of displacements $\alpha(x)$ and $\beta(x)$ during honing without overrun ($l' = 0$)

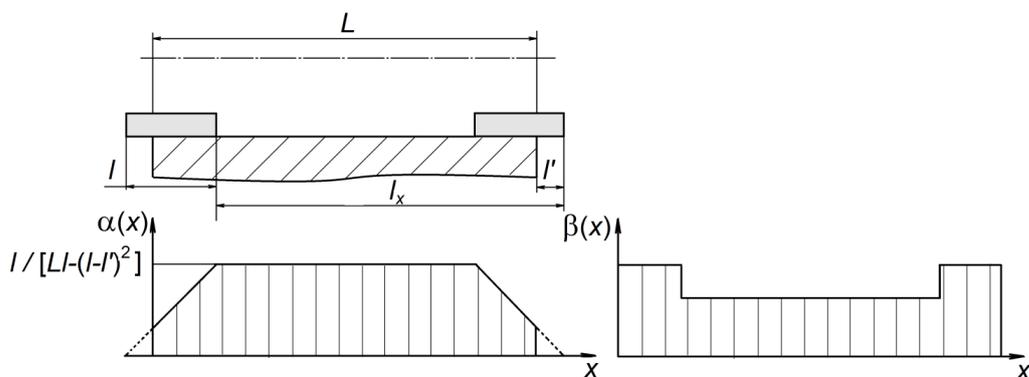


Рис. 3. Кривые распределения перемещений $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ при хонинговании при наличии перебега ($l' \neq 0$)
Fig. 3. Distribution curves of displacements $\alpha(x)$ and $\beta(x)$ during honing in the presence of overrun ($l' \neq 0$)

Уравнение прямой $\alpha(x)$ для участка $0 \leq x \leq l-l'$:

$$\alpha(x) = \frac{(x+l')}{Ll - (l-l')^2} \quad (11)$$

Таким образом, величина относительного перемещения отдельных точек бруска для точки обрабатываемой поверхности с координатой x может быть определена в продольном направлении как

$$S_{\Pi} = V_{\Pi} \alpha(x) \tau,$$

а в направлении вращения головки как

$$S_{\text{В}} = V_{\text{В}} \beta(x) \tau,$$

где τ – продолжительность хонингования.

Для отыскания функции $U(x)$, определяющей сьем металла на участке отверстия с координатой x , необходимо учесть давление хонинговального бруска $p=p(x)$ на этот участок отверстия:

$$U(x) = U_{\Pi}(x) + U_{\text{В}}(x) = k_{\Pi} S_{\Pi} p(x) + k_{\text{В}} S_{\text{В}} p(x), \quad (12)$$

где $U_{\Pi}(x)$, $U_{\text{В}}(x)$ – сьем металла в точке с координатой x от перемещения бруска в продольном направлении и в направлении вращения хонинговальной головки соответственно;

k_{Π} , $k_{\text{В}}$ – коэффициенты удельного съема материала при данных условиях хонингования, обусловленные только поступательным или вращательным движением хонинговальной головки соответственно.

Рассмотрим подробнее случай хонингования при наличии перебега ($l' \neq 0$) (рис. 3) при условии, что эпюра давления в пределах длины контакта бруска с деталью представляет собой прямоугольник, т. е. имеет место равномерное распределение давления в зоне контакта. Учитывая симметричный характер обработки (перебеги по концам отверстия одинаковы), рассмотрим только одну сторону отверстия (рис. 4) для случая, когда $2l < L$. Приведенный на рис. 4 график $p=p(x)$ показывает постепенное снижение давления за счет увеличения площади контакта бруска с деталью. Таким образом, можно выделить три участка по координате x , отличающиеся условиями обработки: 1) $0 \leq x \leq l-l'$; 2) $l-l' < x < l$; 3) $l < x < L-l$. Соответственно, в пределах участков 1 и 3 давление $p=p(x)$ не меняется и составляет:

$$\text{– для участка 1: } p(x) = p_1 = \frac{P_y}{(l-l')b};$$

$$\text{– для участка 3: } p(x) = p_3 = \frac{P_y}{lb}.$$

Тогда для участка 2

$$p(x) = p_2 = \frac{P_y}{l(l-l')b} (2l-l'-x),$$

где P_y – сила прижима бруска к обрабатываемой поверхности;
 b – ширина бруска.

Таким образом, в соответствии с формулой (12), принимая, что $k_{\Pi} = k_{\text{В}} = k$, получим:

$$U_1(x) = U_{\Pi}(x) + U_{\text{В}}(x) = k\tau [V_{\Pi} \alpha_1(x) + V_{\text{В}} \beta(x)] p_1; \quad (13)$$

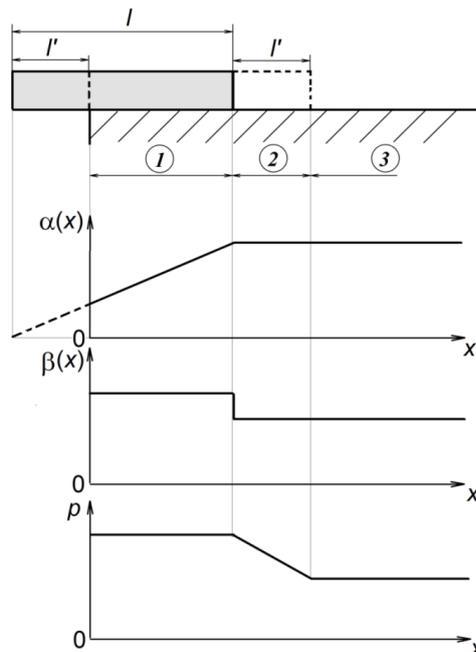


Рис. 4. Функции распределения перемещений $\alpha(x)$, $\beta(x)$ и давлений $p(x)$
Fig. 4. Distribution functions of displacements $\alpha(x)$, $\beta(x)$ and pressures $p(x)$

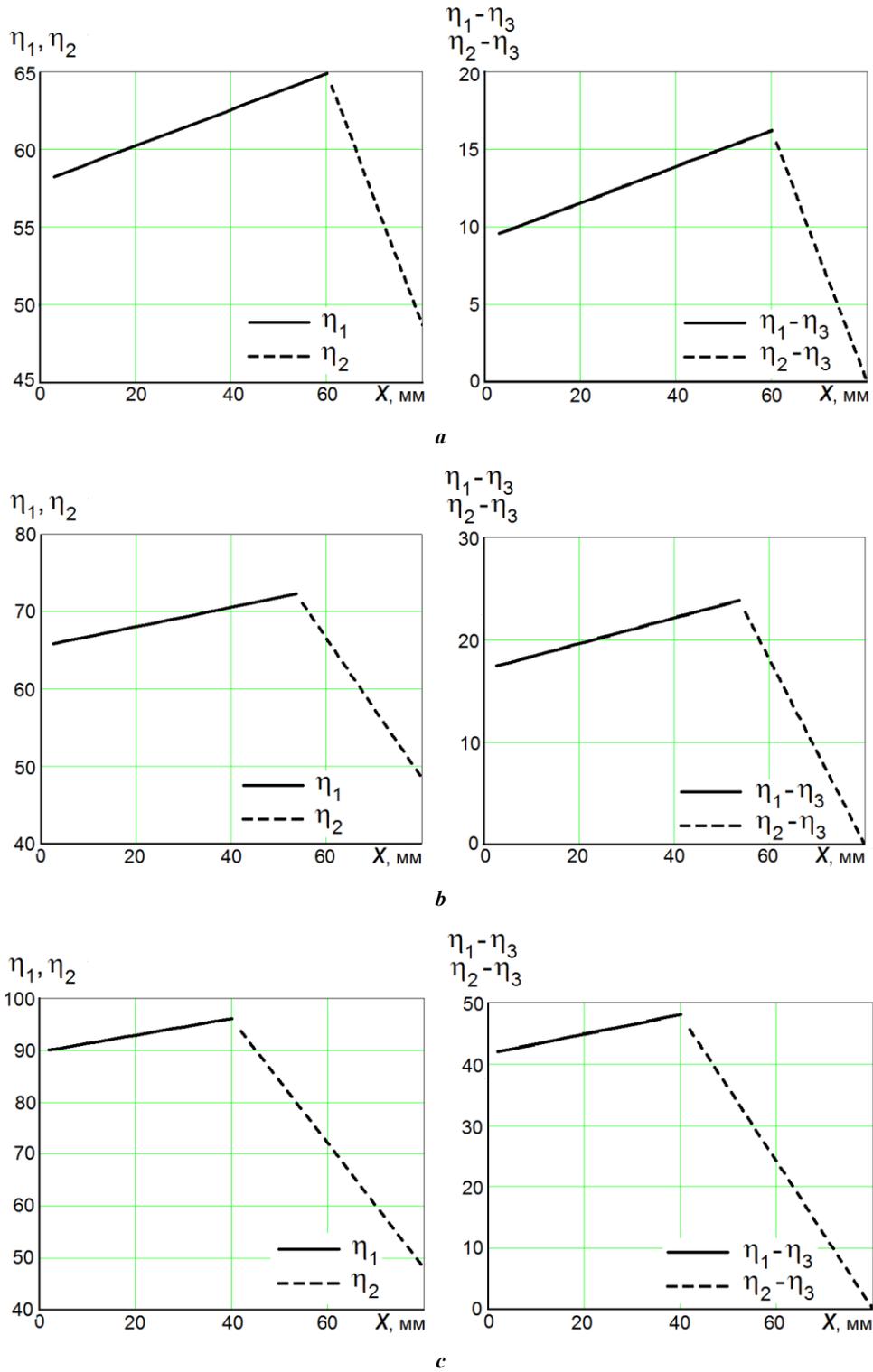


Рис. 5. Значения η_1, η_2, η_3 для $L=300$ мм; $l=80$ мм и $\zeta=1/7$: **a** – $\varepsilon=0,25$; **b** – $\varepsilon=0,33$; **c** – $\varepsilon=0,5$
 Fig. 5. Values of η_1, η_2, η_3 for $L=300$ mm; $l=80$ mm and $\zeta=1/7$: **a** – $\varepsilon=0.25$; **b** – $\varepsilon=0.33$; **c** – $\varepsilon=0.5$

$$U_2(x) = U_{2П}(x) + U_{2В}(x) = k\tau[V_{П}\alpha_2(x) + V_{В}\beta(x)]p_2; \quad (14)$$

$$U_3(x) = U_{3П}(x) + U_{3В}(x) = k\tau[V_{П}\alpha_3(x) + V_{В}\beta(x)]p_3, \quad (15)$$

где с учетом отсутствия задержек хода в крайних положениях $\beta(x)=1/L$.

Если принять, что $V_{П}=\xi V_{В}$, то для сравнения снятия припуска по участкам полученные зависимости (13)–(15) можно представить в виде

$$\eta_1 = \frac{U_1(x)b}{k\tau V_{В} P_y} = \left[\xi\alpha_1(x) + \frac{1}{L} \right] \frac{1}{(l-l')} = \left[\xi \frac{(x+l')}{Ll - (l-l')^2} + \frac{1}{L} \right] \frac{1}{(l-l')} ; \quad (16)$$

$$\eta_2 = \frac{U_2(x)b}{k\tau V_{В} P_y} = \left[\xi\alpha_2(x) + \frac{1}{L} \right] \frac{1}{l(l-l')} (2l-l'-x) = \left[\xi \frac{l}{Ll - (l-l')^2} + \frac{1}{L} \right] \frac{1}{l(l-l')} (2l-l'-x) ; \quad (17)$$

$$\eta_3 = \frac{U_3(x)b}{k\tau V_{В} P_y} = \left[\xi\alpha_3(x) + \frac{1}{L} \right] \frac{1}{l} = \left[\xi \frac{l}{Ll - (l-l')^2} + \frac{1}{L} \right] \frac{1}{l} . \quad (18)$$

На рис. 5 приведены значения η_1 , η_2 , $(\eta_1-\eta_3)$ и $(\eta_2-\eta_3)$ для участков 1 и 2 при различных значениях перебега, где $\varepsilon=l'/l$.

Влияние величины перебега на максимальные значения $(\eta_1-\eta_3)$ при изменении длины бруска (80; 100; 120 мм) показано на графике рис. 6.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных на рис. 5 и 6 графиков следует, что максимальные значения $(\eta_1-\eta_3)$, расположенные на границе участков 1 и 2, определяющие максимальные от-

клонения от прямолинейности образующей обрабатываемого отверстия, будут увеличиваться нелинейно по мере увеличения вылета. Полученный результат совпадает с выводами работы [19] о том, что при наличии перебега неизбежно формируется погрешность формы в продольном сечении в виде седлообразности, которая по мере увеличения величины перебега возрастает.

Влияние величины перебега на максимальные значения $(\eta_1-\eta_3)$ при изменении длины бруска, показанное на рис. 6, свидетельствует о том, что точность обработки будет повышаться с увеличением длины бруска.

Разработанная модель позволяет оценить влияние соотношения поступательной и вращательной скоростей, т. е. коэффициента ξ ($V_{П}=\xi V_{В}$). На рис. 7 приведена зависимость $\max(\eta_1-\eta_3)=f(\xi)$ для $L=300$ мм, $l=100$ мм и $l'=0,3l$, показывающая, что максимальное отклонение образующей отверстия от прямолинейности линейно зависит от коэффициента ξ . Однако при сравнении результатов, показанных на рис. 6 и 7, можно отметить, что влияние давления вследствие изменения перебега весьма существеннее выбора соотношения поступательной и вращательной скоростей бруска.

Учет конкретных условий хонингования (параметры k , τ , $V_{В}$, P_y , b) позволяет с использованием зависимостей (12)...(18) найти значения $U_1(x)$, $U_2(x)$, $U_3(x)$ и определить линейные размеры отклонений образующей отверстия. Полученные аналитические зависимости дают возможность оценить точность геометрической формы отверстия в продольном сечении при хонинговании не только при симметричном, но и при асимметричном характере обработки, когда перебеги по концам отверстия неодинаковы. Указанное обстоятельство особенно актуально при хонинговании глухих отверстий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании разработанной модели хонингования, учитывающей влияние кинематического фактора, получены зависимости, позволяющие оценить погрешности геометрической формы отверстия в продольном сечении. Показано, что доминирующим фактором

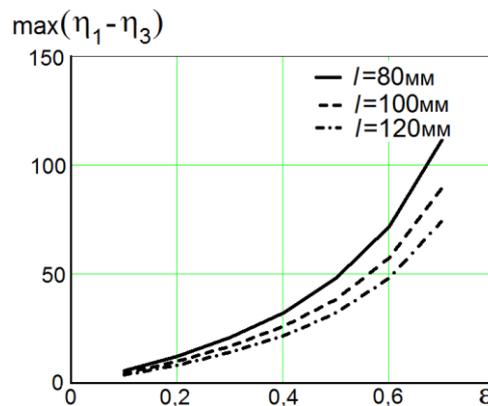


Рис. 6. Влияние величины перебега на максимальные значения $\eta_1-\eta_3$ при изменении длины бруска для $L=300$ мм и $\xi=1/7$

Fig. 6. The influence of the overrun value on the maximum values of $\eta_1-\eta_3$ when changing the length of the stone for $L=300$ mm and $\xi=1/7$



Рис. 7. Зависимость максимальных значений η_1 - η_3 от коэффициента ζ для $L=300$ мм; $l=100$ мм и $\varepsilon=0,3$
 Fig. 7. Dependence of maximum η_1 - η_3 values on the ζ coefficient for $L=300$ mm; $l=100$ mm and $\varepsilon=0.3$

является наличие перебега. Установлено, что вследствие наличия перебега обработанная поверхность имеет склонность к появлению седлообразности. Для повышения точности геометрической формы отверстия в продольном сечении при хонинговании могут быть использованы обоснованные рекомендации по увеличению длины хонинговального бруска и обеспечению постоянства давления в зоне контакта хона и обрабатываемой поверхности при перебега инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sender P., Buj-Corral I. Influence of Honing Parameters on the Quality of the Machined Parts and Innovations in Honing Processes // *Metals*. 2023. Vol. 13. № 1. Article number 140. DOI: [10.3390/met13010140](https://doi.org/10.3390/met13010140).
- Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J., Coba-Salcedo M. Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing // *Precision Engineering*. 2014. Vol. 38. № 1. P. 100–108. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2013.07.009](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.07.009).
- Barakaev N.R., Isamov R.N., Rakhmonov S.K. ugli. Improvement of quality of internal cylindrical surfaces // *European Scholar Journal*. 2021. Vol. 2. № 6. P. 60–63.
- Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M. Analysis of surface texture of plateau-honed cylinder liner – A review // *Precision Engineering*. 2021. Vol. 72. P. 807–822. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2021.08.001](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.08.001).
- Zhang Xueping, Zhou Zaoyang, Yao Zhenqiang, Xi Lifeng. Analytically Predicating the Multi-Dimensional Accuracy of the Honed Engine Cylinder Bore // *Journal of Tribology*. 2020. Vol. 142. № 9. Article number 091201. DOI: [10.1115/1.4046677](https://doi.org/10.1115/1.4046677).
- Yang Changyong, Su Hao, Gao Shaowu, Fu Yucan, Ding Wenfeng, Xu Jiu Hua. Surface quality and geometric accuracy control of fuel nozzle single-pass honing // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 114. P. 3325–3336. DOI: [10.1007/s00170-021-07103-5](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07103-5).
- Бобровский И.Н. Параметры характеристики текстуры после хонингования // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2017. Т. 17. № 3. С. 26–35. DOI: [10.14529/engin170303](https://doi.org/10.14529/engin170303).
- Hoffmeister H.-W., Grosse T., Gerdes A. Investigation of the Influence of Different Process Setting Parameters on the Surface Formation at Honing of Thermally Sprayed Layers // *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 1. P. 371–376. DOI: [10.1016/j.procir.2012.04.066](https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.066).
- Schmitt C., Bahre D. An Approach to the Calculation of Process Forces During the Precision Honing of Small Bores // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 7. P. 282–287. DOI: [10.1016/j.procir.2013.05.048](https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.048).
- Barylski A., Sender P. The Proposition of an Automated Honing Cell with Advanced Monitoring // *Machines*. 2020. Vol. 8. № 4. Article number 70. DOI: [10.3390/machines8040070](https://doi.org/10.3390/machines8040070).
- Schmitt C., Bahre D. Analysis of the Process Dynamics for the Precision Honing of Bores // *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 17. P. 692–697. DOI: [10.1016/j.procir.2014.01.055](https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.055).
- Akkurt A. Comparison of Roller Burnishing Method with Other Hole Surface Finishing Processes Applied on AISI 304 Austenitic Stainless Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010. Vol. 20. P. 960–968. DOI: [10.1007/s11665-010-9718-x](https://doi.org/10.1007/s11665-010-9718-x).
- Pawlus P., Cieslak T., Mathia T. The study of cylinder liner plateau honing process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. № 20. P. 6078–6086. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2009.04.025](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.04.025).
- Sabri L., El Mansori M. Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 204. № 6-7. P. 1046–1050. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2009.05.013](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.013).
- Kapoor J. Parametric Investigations into Bore Honing through Response Surface Methodology // *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 808. P. 11–18. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.808.11](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.808.11).
- El Mansori M., Goedel B., Sabri L. Performance impact of honing dynamics on surface finish of precoated cylinder bores // *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 215. P. 334–339. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2012.09.062](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.062).
- Бабичев А.П., Полянчиков Ю.Н., Славин А.В., Шумячкер В.М., Полянчикова М.Ю., Гусакова Л.В. Хонингование. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. 246 с.

18. Кремень З.И., Стратиевский И.Х. Хонингование и суперфиниширование деталей. Л.: Машиностроение, 1988. 137 с.
 19. Буюкли И.М., Колесник В.М. Повышение точности хонингования отверстий // Труды Одесского политехнического университета. 2015. № 1. С. 34–43. EDN: [TSNFFJ](#).
 20. Наерман М.С., Попов С.А. Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками. М.: Машиностроение, 1971. 224 с.
- REFERENCES**
1. Sender P., Buj-Corral I. Influence of Honing Parameters on the Quality of the Machined Parts and Innovations in Honing Processes. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 1, article number 140. DOI: [10.3390/met13010140](#).
 2. Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J., Coba-Salcedo M. Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing. *Precision Engineering*, 2014, vol. 38, no. 1, pp. 100–108. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2013.07.009](#).
 3. Barakaev N.R., Isamov R.N., Rakhmonov S.K. ugli. Improvement of quality of internal cylindrical surfaces. *European Scholar Journal*, 2021, vol. 2, no. 6, pp. 60–63.
 4. Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M. Analysis of surface texture of plateau-honed cylinder liner – A review. *Precision Engineering*, 2021, vol. 72, pp. 807–822. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2021.08.001](#).
 5. Zhang Xueping, Zhou Zaoyang, Yao Zhenqiang, Xi Lifeng. Analytically Predicating the Multi-Dimensional Accuracy of the Honed Engine Cylinder Bore. *Journal of Tribology*, 2020, vol. 142, no. 9, article number 091201. DOI: [10.1115/1.4046677](#).
 6. Yang Changyong, Su Hao, Gao Shaowu, Fu Yucan, Ding Wenfeng, Xu Jiuhua. Surface quality and geometric accuracy control of fuel nozzle single-pass honing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 114, pp. 3325–3336. DOI: [10.1007/s00170-021-07103-5](#).
 7. Bobrovskiy I.N. The characterization parameters of the texture after honing. *Bulletin of the South Ural State University. Series “Mechanical engineering industry”*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 26–35. DOI: [10.14529/engin170303](#).
 8. Hoffmeister H.-W., Grosse T., Gerdes A. Investigation of the Influence of Different Process Setting Parameters on the Surface Formation at Honing of Thermally Sprayed Layers. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 371–376. DOI: [10.1016/j.procir.2012.04.066](#).
 9. Schmitt C., Bahre D. An Approach to the Calculation of Process Forces During the Precision Honing of Small Bores. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 7, pp. 282–287. DOI: [10.1016/j.procir.2013.05.048](#).
 10. Barylski A., Sender P. The Proposition of an Automated Honing Cell with Advanced Monitoring. *Machines*, 2020, vol. 8, no. 4, article number 70. DOI: [10.3390/machines8040070](#).
 11. Schmitt C., Bahre D. Analysis of the Process Dynamics for the Precision Honing of Bores. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 17, pp. 692–697. DOI: [10.1016/j.procir.2014.01.055](#).
 12. Akkurt A. Comparison of Roller Burnishing Method with Other Hole Surface Finishing Processes Applied on AISI 304 Austenitic Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2010, vol. 20, pp. 960–968. DOI: [10.1007/s11665-010-9718-x](#).
 13. Pawlus P., Cieslak T., Mathia T. The study of cylinder liner plateau honing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, no. 20, pp. 6078–6086. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2009.04.025](#).
 14. Sabri L., El Mansori M. Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 204, no. 6-7, pp. 1046–1050. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2009.05.013](#).
 15. Kapoor J. Parametric Investigations into Bore Honing through Response Surface Methodology. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 808, pp. 11–18. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.808.11](#).
 16. El Mansori M., Goedel B., Sabri L. Performance impact of honing dynamics on surface finish of precoated cylinder bores. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 215, pp. 334–339. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2012.09.062](#).
 17. Babichev A.P., Polyanchikov Yu.N., Slavin A.V., Shumyacher V.M., Polyanchikova M.Yu., Gusakova L.V. *Khoningovanie* [Honing]. Volgograd, VolgGASU Publ., 2013. 246 p.
 18. Kremen Z.I., Stratievskiy I.Kh. *Khoningovanie i superfinishirovanie detaley* [Honing and superfinishing of parts]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988. 137 p.
 19. Buyukli I.M., Kolesnik V.M. Improving accuracy of holes honing. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 34–43. EDN: [TSNFFJ](#).
 20. Naerman M.S., Popov S.A. *Pretzionnaya obrabotka detaley almaznymi i abrazivnymi bruskami* [Precision machining of parts with diamond and abrasive stones]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 224 p.

Accuracy of the geometric shape of the hole in the longitudinal section during honing

© 2024

*Aleksandr F. Denisenko*¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
professor of Chair “Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools”

*Roman G. Grishin*², PhD (Engineering), Associate Professor,
assistant professor of Chair “Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools”

*Evgeniya D. Antipova*³, postgraduate student
of Chair “Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools”

Samara State Technical University, Samara (Russia)

*E-mail: tmsi@samgtu.ru,
sammortor@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6393-2831>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4511-9147>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1759-7080>

Received 29.02.2024

Accepted 16.07.2024

Abstract: The wide application of honing as a finishing treatment of internal cylindrical surfaces for cylinder-piston systems, used in some structures, is caused by high accuracy measured in tenths of a micrometer, and high productivity of the process. The most important indicator of reliable operation of cylinder-piston systems are high requirements for the geometric accuracy of holes. Due to the lack of sufficient theoretical justification for the selection of honing parameters ensuring the accuracy of the geometric shape of the hole in the longitudinal section, the authors proposed a model for the formation of errors in the geometric shape of the hole. The model is built on the kinematic characteristics of the process including the ratio of the honing stone dimensions, the length of the hole, the stroke of the honing head, the ratio of the speeds of translational and rotational movements, and the force action in the processing zone, which changed due to the presence of an overrun of the honing stone. To obtain analytical dependencies ensuring the minimisation of form deviations, the conditions for stock removal for the points of the machined surface were considered, the value of which was taken proportional to the path of movement, and the pressure value. For this purpose, graphs of the distribution functions of displacements and pressure changes were constructed depending on the coordinate of the point location on the generating line of the hole being machined. Using the obtained analytical dependencies, the potential occurrence of a shape error in the form of a saddle shape was found, the dominant factor influencing the value of which is the value of the honing stone overrun. At the same time, it was identified that the ratio of the speeds of translational and rotational movements has an insignificant effect on the violation of the form in the longitudinal section.

Keywords: honing; geometric accuracy of holes; kinematic characteristics of honing; value of overrun; displacement distribution function.

For citation: Denisenko A.F., Grishin R.G., Antipova E.D. Accuracy of the geometric shape of the hole in the longitudinal section during honing. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 3, pp. 53–62. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-3-69-5.