

УДК 62.923.5

ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКИХ ОТВЕРСТИЙ В ПРОДОЛЬНОМ СЕЧЕНИИ ПРИ ХОНИНГОВАНИИ

© 2024 А.Ф. Денисенко, Р.Г. Гришин, Е.Д. Антипова

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.06.2024

Использование хонингования при финишной обработке отверстий для цилиндропоршневых систем позволяет обеспечить высокую геометрическую точность обрабатываемых поверхностей и сформировать микрорельеф в виде поперечных царапин, обеспечивающих удержание и циркуляцию масла при эксплуатации. Основные выходные параметры процесса хонингования, характеризующиеся точностью геометрической формы и шероховатостью обработанной поверхности, а также производительностью обработки и стойкостью брусков, зависят от сочетания технологических, кинематических, силовых и масштабно-геометрических факторов. Как показал анализ опубликованных результатов исследований выбор параметров процесса хонингования для обеспечения точности геометрической формы отверстия в продольном сечении базируется на эмпирических методах, полученных для конкретных условий хонингования и не может быть использован в других условиях без проведения необходимых теоретических обоснований. В связи с этим была разработана модель образования погрешностей геометрической формы коротких отверстий в продольном сечении при хонинговании по схеме обработки с перекрытием зон обработки по длине отверстия, построенная на учете масштабно-геометрических факторов, включающих соотношение размеров хонинговального бруска, длины отверстия, хода хонинговальной головки, а также соотношения скоростей поступательного и вращательного движений и силового воздействия в зоне обработки. Для получения аналитических зависимостей, оценивающих отклонения геометрической формы, были рассмотрены условия съема металла, величина которого принималась пропорциональной перемещению отдельных точек бруска относительно выбранной точки обрабатываемой поверхности 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. Полученные аналитические зависимости подтвердили потенциальное появления погрешности формы в виде бочкообразности, и позволили оценить влияние длины хонинговальных брусков, величины перебега и соотношения поступательной и вращательной скоростей на их величину.

Ключевые слова: хонингование коротких отверстий, масштабно-геометрические факторы, геометрическая точность, величина перебега, функция распределения перемещений.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-222-228

EDN: HСAMQZ

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность использования в производственных процессах методов абразивной обработки определяется характеристиками конечного качества поверхности обрабатываемой детали [1, 2].

Использование хонингования при финишной обработке отверстий позволяет не только

обеспечить высокую геометрическую точность обрабатываемых поверхностей, но и сформировать микрорельеф в виде поперечных царапин, нанесенных на поверхность двумя движениями инструмента, что делается с целью придания поверхности особых эксплуатационных характеристик с точки зрения удержания и циркуляции масла. Поэтому обычно хонингование используется для обработки поверхностей отверстий в цилиндропоршневых системах, отвечающих требованиям по геометрической и размерной точности [3-7], а также для обеспечения текстуры поверхности [8-13]. Кинематика процесса включает три основных движения: вращение вокруг оси инструмента, линейное возвратно-поступательное движение и движение подачи хонинговального бруска в радиальном направлении (подача на врезание).

Денисенко Александр Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: sammortor@yandex.ru

Гришин Роман Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: grg-s1@mail.ru

Антипова Евгения Дмитриевна, аспирант кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: antipova.ev.smr@yandex.ru

Основные выходные параметры процесса хонингования, характеризующиеся точностью геометрической формы и шероховатостью обработанной поверхности, а также производительностью обработки и стойкостью брусков, зависят от сочетания различных факторов, которые могут быть разделены на следующие основные группы.

1. Технологические факторы: физико-механические свойства обрабатываемого материала (состав материала и варианты его изготовления); характеристики брусков (вид абразивного зерна и его концентрация, размер абразивного зерна, вид абразивного связующего); количество хонинговальных брусков инструмента; форма хонинговального бруска; состав смазочно-охлаждающей жидкости; состояние поверхности заготовки перед хонингованием (поверхностная твердость, шероховатость, защитные пропитки, гальванопокрытия и т. п.); отклонения от первоначальной формы хонингуемого отверстия после механической обработки.

2. Кинематические факторы: величины и закон изменения скоростей и ускорений относительных движений инструмента и детали, а также соотношение скоростей этих движений, характеризующие плотность и угол сетки траектории; время задержки хонинговальной головки в точках реверсирования ее возвратно-поступательного движения.

3. Силовые факторы: средняя величина и закон изменения контактного давления в сопряжении инструмент - обрабатываемая поверхность, определяемые движением подачи хонинговального бруска в радиальном направлении.

4. Масштабно-геометрические факторы: размеры хонингуемого отверстия; размеры брусков (длина и ширина абразивного инструмента); соотношение длин отверстия и брусков; наладочная схема хонингования (величины хода и перебега брусков).

В проведенных ранее исследованиях достаточно подробно изучалось получение хонингованных отверстий с минимальными отклонениями от цилиндрической формы [3, 5-7, 14-16].

Вместе с тем по обеспечению формы отверстия в продольном сечении в опубликованных немногочисленных работах, например [17-20], имеются лишь рекомендации по выбору параметров хонингования, строящиеся на основе ряда экспериментальных данных, ценность которых существенно зависит от конкретных условий хонингования.

Таким образом, разработка обоснованных рекомендаций, основанных на моделировании реальных циклов хонингования, является актуальной задачей, требующей дальнейших исследований.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Авторы работ по хонингованию [17-20], исходя из практического опыта и достаточно большого объема экспериментальных исследований, установили, что для получения правильной геометрической формы обрабатываемого отверстия бруски должны выходить из отверстия на некоторую величину, называемую перебегом. Однако, отмечается, что при неправильно выбранном симметричном перебеге в отверстии может быть получена седлообразность или бочкообразность [19]. В указанный в работе [19] диапазон изменения величин перебегов $l' = (0,33 \dots 0,25)l = opt$, где l – длина бруска, укладываются значения, рекомендуемые в работах [1, 2, 18; 21-23]. Однако отсутствуют четкие обоснования по выбору конкретных величин.

Вместе с тем данные рекомендации должны базироваться на анализе формирования погрешностей обработки в продольном сечении отверстия, что не нашло отражения в опубликованных источниках.

Для получения аналитических зависимостей, позволяющих определить величины отклонений формы, необходимо рассмотреть условия съема металла при хонинговании.

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 :

$$U = kpS, \quad (1)$$

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

В зависимости от масштабных-геометрических факторов при обработке коротких отверстий могут быть реализованы следующие схемы обработки (рис.1).

В литературе, посвященной хонингованию, под термином «короткое отверстие» понимается отверстие, протяженность которого вдоль оси соизмерима с протяженностью (длиной) хонинговального бруска. Обычно под термином «короткое отверстие» понимается отверстие, у которого протяженность вдоль его оси не превышает 300 мм. Это связано с тем, что протяженность хонинговальных брусков (размер хонинговальных брусков вдоль оси хонинговальной головки) не должна быть менее 50 % протяженности отверстия, а отечественная промышленность производит хонинговальные бруски размером не более 150 мм [24].

Обработка по схеме рис. 1, а исследована лучше, т. к. она может применяться как при обработке как коротких, так и длинных отверстий

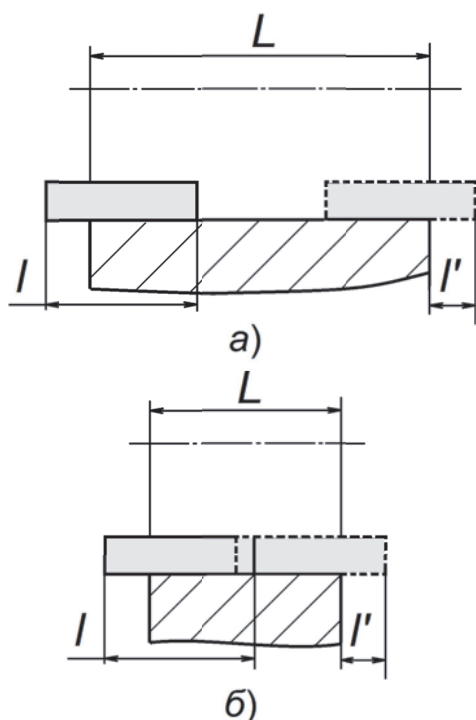


Рис. 1. Схемы хонингования коротких отверстий

и расчетная модель практически не меняется при изменении длины отверстия L . Для диапазона длин отверстий $L_{min} < L < 300$ в зависимости от выбранной длины абразивных брусков могут использоваться обе схемы рис. 1. При длине отверстия $L < L_{min}$ обработка может вестись только по схеме рис. 1, б. Значение L_{min} находится из зависимости:

$$L_{min} = 2(l_{min} - l'). \quad (2)$$

Поскольку в соответствии СТ СЭВ 24–75 (ГОСТ 25594–83) минимальная длина брусков составляет 25 мм, то при общепринятом перебеге равном 1/3 длины бруска L_{min} будет равно $L_{min} = 2(25 - 0,33 \cdot 25) = 33,5$ мм.

Рассмотрим условия формирования погрешностей для обработки по схеме рис. 1, б.

Для того, чтобы учесть, какая доля общего пути трения приходится на отдельные участки поверхности детали и рабочей поверхности брусков, в работе [21] предложено ввести функцию распределения перемещений $\alpha(x)$ в продольном направлении и функцию распределения перемещений $\beta(x)$ в результате вращения головки.

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: $S_{В} = V_{В} \beta(x) \tau$, где τ – продолжительность хонингования.

В соответствии с зависимостью (1) сьем металла в точке отверстия с координатой x определяется выражением

$$U(x) = U_{\Pi}(x) + U_{В}(x) = k_{\Pi} S_{\Pi} p(x) + k_{В} S_{В} p(x), \quad (3)$$

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

$p(x)$ – давление хонинговального бруска на участке отверстия с координатой x ;

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

Для рассматриваемой схемы обработки функции $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ будут иметь вид, приведенный на рис. 2.

Найдем уравнение наклонной прямой функции $\alpha(x)$, обозначив ее как $\alpha(x) = ax + b$. Для этого воспользуемся геометрическими соотношениями и условием нормировки, в соответствии с которым площадь, ограниченная кривой распределения и осью абсцисс, равна 1:

$$\begin{cases} 0,5\alpha_{max} = \frac{b}{l'}; \\ 0,5L + l' = \frac{b}{l'}; \\ 0,5\alpha_{max} = a \frac{L}{2} + b; \\ 0,5[L - (l - l')] [2b + aL - a(l - l')] + \alpha_{max} [(l - l') - 0,5L] = 0,5. \end{cases} \quad (4)$$

Система уравнений (4) позволяет найти три неизвестных $\alpha_{max}; a; b$:

$$\alpha_{max} = \frac{L + 2l'}{l' [l^2 - (l')^2]}; \quad a = \frac{1}{l' [l^2 - (l')^2]}; \quad b = \frac{1}{l^2 - (l')^2}. \quad (5)$$

Таким образом, искомое уравнение имеет вид

$$\alpha(x) = \frac{x + l'}{l' [l^2 - (l')^2]}. \quad (6)$$

Для коэффициента $\beta(x)$ условие нормировки будет определяться выражением

$$2 \cdot 0,5\beta_{max} [L - (l - l')] + \beta_{max} [2(l - l') - L] = 1. \quad (7)$$

Откуда

$$\beta_{max} = \frac{1}{l - l'}. \quad (8)$$

Эпюра $p(x)$ учитывает, что давление при перебеге за счет уменьшения площади контакта увеличивается. Перекрытие зон обработки по длине отверстия (рис. 2) позволяет считать, что

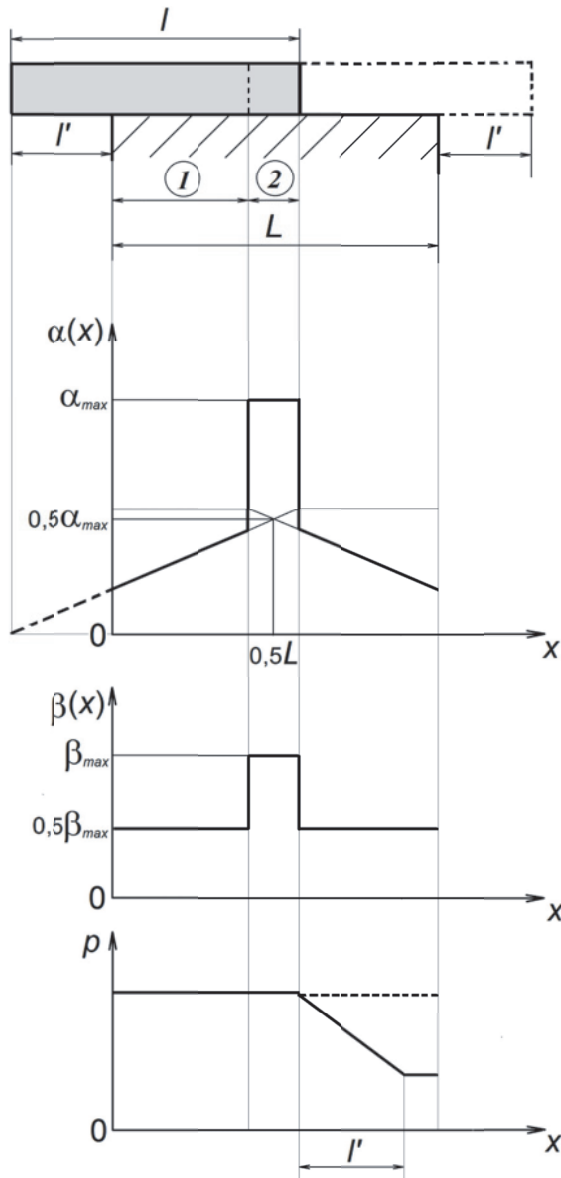


Рис. 2. Схема перемещения хонинговальных брусков при обработке коротких отверстий, функции распределения перемещений $\alpha(x)$, $\beta(x)$ и давлений $p(x)$

$p = p(x) = p_{max} = \frac{P_y}{b(l-l')}$, где P_y - сила прижима бруска к обрабатываемой поверхности; b - ширина бруска.

Таким образом, в соответствии с формулой (3), принимая, что $k_{II} = k_B = k$, для участков 1 и 2 (рис. 2) получим соответственно

$$U_1(x) = U_{II}(x) + U_{IB}(x) = k\tau[V_{II}\alpha_1(x) + 0,5V_B\beta_{max}]p_{max}; \quad (9)$$

$$U_2(x) = U_{2II}(x) + U_{2B}(x) = k\tau[V_{II}\alpha_{max} + V_B\beta_{max}]p_{max}. \quad (10)$$

Приведенные на рис. 2 графики свидетельствуют о том, что сьем металла в средней части отверстия должен быть существенно выше, то есть отверстие будет иметь бочкообразность. Оценим возможные величины указанного отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Принимая, что $V_{II} = \xi V_B$, то для сравнения снятия металла по участкам 1 и 2 полученные зависимости (9)-(10) можно представить в виде, включающем масштабно-геометрические факторы и коэффициент ξ :

$$\eta_1 = \frac{U_1(x)b}{k\tau V_B P_y} = [\xi\alpha_1(x) + 0,5\beta_{max}] \frac{1}{(l-l')} = \left[\xi \frac{(x+l')}{l'[l^2 - (l')^2]} + \frac{1}{2(l-l')} \right] \frac{1}{(l-l')}; \quad (11)$$

$$\eta_2 = \frac{U_2(x)b}{k\tau V_B P_y} = \left[\xi\alpha_{max} + \frac{1}{l-l'} \right] \frac{1}{(l-l')} = \left[\xi \frac{L+2l'}{l'[l^2 - (l')^2]} + \frac{1}{l-l'} \right] \frac{1}{(l-l')}. \quad (12)$$

Зависимости (11) и (12) дают возможность рассмотреть, как влияет длина бруска и величина перебега на значения возможных отклонений формы в продольном сечении.

Для этого на примере обработки отверстия $L = 0,1$ м при $\xi = 1/7$ вычислим

$$\max(\eta_2 - \eta_1) = (\eta_2 - \eta_{1min}) = f(l, \varepsilon), \quad (13)$$

где $\varepsilon = l'/l$.

На рис. 3 приведены графики $\max(\eta_2 - \eta_1) = f(l)$, а на рис. 4 - графики $\max(\eta_2 - \eta_1) = f(\varepsilon)$.

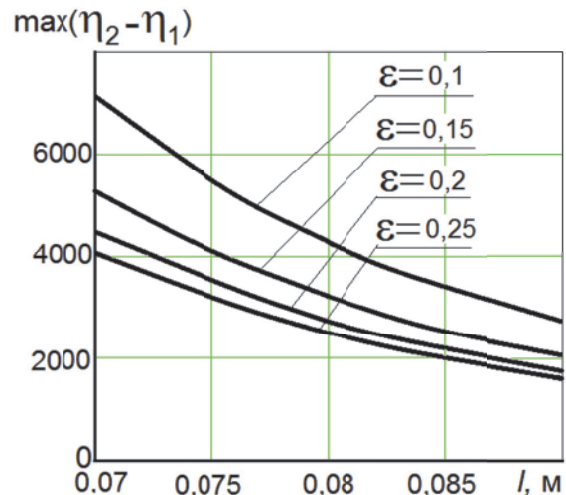


Рис. 3. Зависимости $\max(\eta_2 - \eta_1) = f(l)$

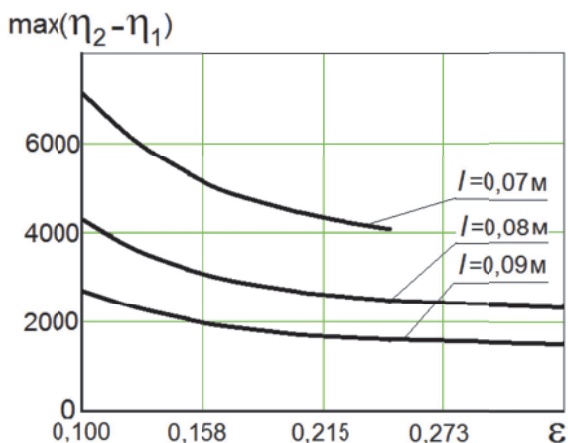


Рис. 4. Зависимости $\max(\eta_2 - \eta_1) = f(\epsilon)$

Полученные результаты свидетельствуют, что разность съема металла по краям отверстия и в середине его длины существенно снижается с увеличением длины бруска. Причем интенсивность указанного снижения практически не зависит от значений перебега. Так, например, для $\epsilon = 0,1$ при увеличении длины бруска с 0,07 м до 0,09 м $\max(\eta_2 - \eta_1)$ уменьшается в 2,6, а для $\epsilon = 0,25$ – в 2,5. При этом в абсолютном выражении $\max(\eta_2 - \eta_1)$ существенно выше при малых значениях перебега.

По мере увеличения перебега разность съема металла по краям отверстия и в середине его длины снижается, постепенно стабилизируясь. При этом по мере уменьшения длины хонинговального бруска граница стабилизации наступает при больших значениях ϵ : для $l = 0,09$ м $\epsilon_{min} \approx 0,21$; для $l = 0,08$ м $\epsilon_{min} \approx 0,25$. Для $l = 0,07$ м стабилизация не наблюдается, так как зона изменения ϵ ограничивается условием (2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных на рис. 3 и 4 графиков следует, что значения $\max(\eta_2 - \eta_1)$, определяющие максимальные отклонения от прямолинейности образующей обрабатываемого отверстия, будут увеличиваться нелинейно по мере уменьшения величины перебега и длины бруска. Таким образом, точность обработки при рассматриваемых масштабных-геометрических факторах и схеме обработки будет повышаться с увеличением длины брусков ($l < L$) и увеличением перебега ($\epsilon \leq 0,25$).

Полученный результат совпадает с выводами работы [19] о том, что при хонинговании отверстий с перекрытием зон обработки по длине отверстия при наличии перебега неизбежно формируется погрешность формы в продольном сечении в виде бочкообразности.

Разработанная модель позволяет оценить также влияние соотношения поступательной и

вращательной скоростей, то есть коэффициента ξ ($V_{\Pi} = \xi V_B$), на точность геометрической формы при схеме с перекрытием зон обработки по длине отверстия. На рис. 5 приведена зависимость $\max(\eta_2 - \eta_1)$ для $l = 0,08$ м и $\epsilon = 0,25l$, показывающая, что максимальное отклонение образующей отверстия от прямолинейности линейно зависит от коэффициента ξ . При сравнении результатов, показанных на графиках рис. 3, 4 и 5, можно отметить, что влияние соотношения поступательной и вращательной скоростей бруска соизмеримо с влиянием масштабных-геометрических факторов.

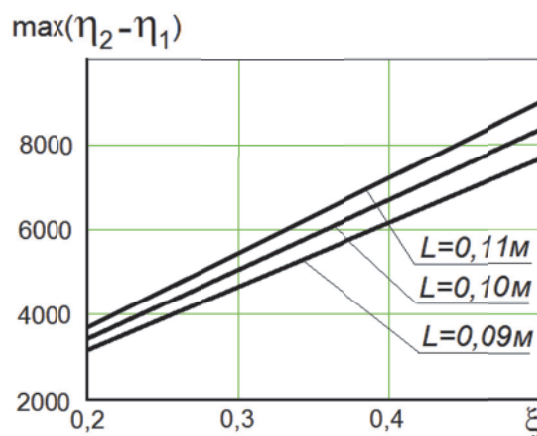


Рис. 5. Зависимость $\max(\eta_2 - \eta_1)$ от коэффициента ξ для $l = 0,08$ м и $\epsilon = 0,25$

Учет конкретных условий хонингования (параметры $k; \tau; V_B; P_y; b$), позволяет с использованием зависимостей (3)...(12) найти значения $U_1(x)$; и $U_2(x)$ определить линейные размеры отклонений образующей отверстия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании разработанной модели хонингования, учитывающей влияние масштабных-геометрического фактора, получены зависимости, позволяющие оценить погрешности геометрической формы отверстия в продольном сечении для схемы обработки с перекрытием зон обработки по длине отверстия. Показано, что использование рассматриваемой схемы сопровождается появлением бочкообразности. Установлено, что указанная погрешность может быть снижена при увеличении длины хонинговальных брусков и величины перебега.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратиевский, И.Х. Абразивная обработка / И.Х. Стратиевский, В.Г. Юрьев, Ю.М. Зубарев. – М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.
2. Ящерицын, П.И. Чистовая обработка деталей в машиностроении / Ящерицын П.И., Мартынов А.Н.

- Мн.: Выш. школа, 1983. – 191 с.
3. *Grzesik W.* Basics of Machining of Constructional Materials. – Warsaw: WNT Publishing House, 2010.
 4. *Pawlus P., Cieslak T., Mathia T.* The study of cylinder liner plateau honing process // *J. Mater. Process. Technol.* 2009. Vol. 209. – P. 6078-6086. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.04.025>.
 5. *Akkurt A.* Comparison of Roller Burnishing Method with Other Hole Surface Finishing Processes Applied on AISI 304 Austenitic Stainless Steel // *J. Mater. Eng. Perform.* 2010. Vol. 20. P.960-968. DOI:10.1007/s11665-010-9718-x.
 6. *Kapoor J.* Parametric Investigations into Bore Honing through Response Surface Methodology // *Mater. Sci. Forum.* 2014. Vol. 808. P.11-18. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.808.11>.
 7. *El Mansori M., Goedel B., Sabri L.* Performance impact of honing dynamics on surface finish of precoated cylinder bores // *Surf. Coatings Technol.* 2013. Vol. 215. P. 334-339. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.062>.
 8. *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. P. 140. <https://doi.org/10.3390/met13010140>.
 9. *Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J., Coba-Salcedo M.* Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing // *Precis. Eng.* 2014. Vol. 38. P. 100-108. DOI:10.1016/j.precisioneng.2013.07.009.
 10. *Бобровский, И.Н.* Параметры характеристики текстуры после хонингования / И.Н. Бобровский // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение.* – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 26-35.
 11. *Hoffmeister H.-W., Grosse T., Gerdes A.* Investigation of the Influence of Different Process Setting Parameters on the Surface Formation on Honing of Thermally Sprayed Layers // *Procedia CIRP.* 2012. Vol. 1. P. 371-376. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.066>.
 12. *Nguyen, TT., Vu, TC., Duong, QD.* Multi-responses optimization of finishing honing process for surface quality and production rate // *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2020. Vol. 42. P. 604. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02690-y>.
 13. *Schmitt C., Bahre D.* Analysis of the Process Dynamics for the Precision Honing of Bores // *Procedia CIRP.* 2014. Vol. 17. P. 692-697. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.055>.
 14. *Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M.* Analysis of surface texture of plateau-honed cylinder liner – A review // *Precis. Eng.* 2021. Vol. 72. P. 807–822. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.08.001>.
 15. *Zhang X., Zhu X., Cheng L., Gong H., Yan B., Lee J.H.* The Influence Study of Ultrasonic honing parameters to workpiece surface temperature // *MATEC Web Conf.* 2016. Vol. 45. P.04008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164504008>.
 16. *Sabri L., El Mansori M.* Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools // *Surf. Coatings Technol.* 2009. Vol. 204. P.1046-1050. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.013>.
 17. *Бабичев, А.П.* Хонингование / А.П. Бабичев, Ю.Н. Полянчиков, А.В. Славин [и др.]. – Волгоград : ВолгАСУ, 2013. – 245 с.
 18. *Кремень, З.И.* Хонингование и суперфиниширование деталей / З.И. Кремень, И.Х. Стратиевский. – Л.: Машиностроение, 1988. – 137 с.
 19. *Буюкли, И.М.* Повышение точности хонингования отверстий / И.М. Буюкли, В.М. Колесник // *Труды Одесского политехнического университета.* – 2015. – № 1(45). – С. 34-43.
 20. *Муратов, К.Р.* Технологические методы повышения точности геометрической формы обрабатываемых отверстий при хонинговании / К.Р. Муратов, Е.А. Гашев // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2012. – Т. 14. – № 1-2. – С. 402-404.
 21. *Наерман М.С.* Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками / М.С. Наерман, С.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.
 22. *Сагарда, А.А.* Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А.А. Сагарда, И.Х. Чеповецкий, Л.Л. Мишнаевский. – Киев: Техніка, 1974. – 180 с.
 23. *Билик, Ш.М.* Макрогеометрия деталей машин / Ш.М. Билик. – М.: Mashgiz, 1962, – 275 с.
 24. *Бахвалов, В.А.* Процессы обработки заготовок: учеб. пособие : в 4 ч. Часть 4. Хонингование / В.А. Бахвалов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – 151 с.

FORMATION OF GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF SHORT HOLES IN THE LONGITUDINAL SECTION DURING HONING

© 2024 A.F. Denisenko, R.G. Grishin, E.D. Antipova

Samara State Technical University, Samara, Russia

The use of honing when finishing holes for cylinder-piston systems makes it possible to ensure high geometric accuracy of the treated surfaces and to form a microrelief in the form of transverse scratches, ensuring retention and circulation of oil during operation. The main output parameters of the honing process, characterized by the accuracy of the geometric shape and the roughness of the machined surface, as well as the processing productivity and durability of the bars, depend on a combination of technological, kinematic, power and scale-geometric factors. As an analysis of published research results has shown, the choice of honing process parameters to ensure the accuracy of the geometric shape of the hole in the longitudinal section is based on empirical methods obtained for specific honing conditions and cannot be used in other conditions without the necessary theoretical justification. In this regard, a model was developed for the formation of errors in the geometric shape of short holes in the longitudinal section during honing according to a processing scheme with overlapping processing zones along the length of the hole, built on the basis of scale-geometric factors, including the ratio of the dimensions of the honing stone, the length of the hole, the stroke of the honing head, as well as the ratio of the speeds of translational and rotational movements and force influence in the processing zone. To obtain analytical dependencies that evaluate deviations of the geometric shape, the conditions for metal removal were considered, the value of which was taken to be proportional to the movement of individual points of the bar relative to the selected point of the treated surface 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 location of the point on the generatrix of the hole being machined. The obtained analytical dependencies confirmed the potential appearance of a shape error in the form of barrel-shape, and made it possible to evaluate the influence of the length of the honing stones, the amount of overtravel and the ratio of translational and rotational speeds on their value.

Key words: honing of short holes, scale-geometric factors, geometric accuracy, overtravel, displacement distribution function.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-222-228

EDN: HСAMQZ

REFERENCES

1. *Stratievskij, I.H.* Abrazivnaya obrabotka / I.H. Stratievskij, V.G. Yur'ev, Yu.M. Zubarev. – M.: Mashinostroenie, 2010. – 352 s.
2. *Yashchericyn, P.I.* Chistovaya obrabotka detalej v mashinostroenii / Yashchericyn P.I., Martynov A.N. – Mn.: Vysh. shkola, 1983. – 191 s.
3. *Grzesik W.* Basics of Machining of Constructional Materials. – Warsaw: WNT Publishing House, 2010.
4. *Pawlus P., Cieslak T., Mathia T.* The study of cylinder liner plateau honing process // J. Mater. Process. Technol. 2009. Vol. 209. – P. 6078-6086. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.04.025>.
5. *Akkurt A.* Comparison of Roller Burnishing Method with Other Hole Surface Finishing Processes Applied on AISI 304 Austenitic Stainless Steel // J. Mater. Eng. Perform. 2010. Vol. 20. P.960-968. DOI:10.1007/s11665-010-9718-x.
6. *Kapoor J.* Parametric Investigations into Bore Honing through Response Surface Methodology // Mater. Sci. Forum. 2014. Vol. 808. P.11-18. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.808.11>.
7. *El Mansori M., Goedel V., Sabri L.* Performance impact of honing dynamics on surface finish of precoated cylinder bores // Surf. Coatings Technol. 2013. Vol. 215. P. 334-339. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.062>.
8. *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. P. 140. <https://doi.org/10.3390/met13010140>.
9. *Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J., Coba-Salcedo M.* Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing // Precis. Eng. 2014. Vol. 38. P. 100-108. DOI:10.1016/j.precisioneng.2013.07.009.
10. *Bobrovskij I.N.* Parametry harakterizacii tekstury posle honingovaniya / I.N. Bobrovskij // Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie. – 2017. – T. 17. – № 3. – S. 26-35.
11. 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. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.066>.
12. *Nguyen, TT., Vu, TC., Duong, QD.* Multi-responses optimization of finishing honing process for surface quality and production rate // J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 2020. Vol. 42. P. 604. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02690-y>.
13. *Schmitt C., Bahre D.* Analysis of the Process Dynamics for the Precision Honing of Bores // Procedia CIRP. 2014. Vol. 17. P. 692-697. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.055>.
14. *Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M.* Analysis of surface texture of plateau-honed cylinder liner – A review // Precis. Eng. 2021. Vol. 72. P. 807-822. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.08.001>.
15. *Zhang X., Zhu X., Cheng L., Gong H., Yan V., Lee J.H.* The Influence Study of Ultra-sonic honing parameters to workpiece surface temperature // MATEC Web Conf. 2016. Vol. 45. P. 04008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164504008>.
16. *Sabri L., El Mansori M.* Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools // Surf. Coatings Technol. 2009. Vol. 204. P.1046-1050. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.013>.
17. *Babichev, A.P.* Honingovanie / A.P. Babichev, YU.N. Polyanchikov, A.V. Slavin [i dr.]. – Volgograd : VolgGASU, 2013. – 245 c.
18. *Kremen', Z.I.* Honingovanie i superfinishirovanie detalej / Z.I. Kremen', I.H. Stratievskij. – L.: Mashinostroenie, 1988. – 137 s.
19. *Buyukli, I.M.* Povyshenie tochnosti honingovaniya otverstij / I.M. Buyukli, V.M. Kolesnik // Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2015. – № 1(45). – S. 34-43.
20. *Muratov, K.R.* Tekhnologicheskie metody povysheniya tochnosti geometricheskoy formy obrabatyvaemykh otverstij pri honingovanii / K.R. Muratov, E.A. Gashev // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2012. – T. 14. – № 1-2. – S. 402-404.
21. *Naerman, M.S.* Precizionnaya obrabotka detalejalmaznymi i abrazivnymi bruskami / M.S. Naerman, S.A. Popov. – M.: Mashinostroenie, 1971. – 224 s.
22. *Sagarda, A.A.* Almazno-abrazivnaya obrabotka detalej mashin / A.A. Sagarda, I.H. Chepoveckij, L.L. Mishnaevskij. – Kiev: Tekhnika, 1974. – 180 s.
23. *Bilik, Sh.M.* Makrogeometriya detalej mashin / SH.M. Bilik. – M.: Mashgiz, 1962, – 275 s.
24. *Bahvalov, V.A.* Processy obrabotki zagotovok : ucheb. posobie : v 4 ch. Chast' 4. Honingovanie / V.A. Bahvalov. – Perm': Izd-vo Perm. nac. issled. politekhn. un-ta, 2019. – 151 s.

Alexander Denisenko, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor of the Department of Engineering Technology, Machine Tools and Tools. E-mail: sammortor@yandex.ru

Roman Grishin, PhD in Engineering Sciences, Assistant professor of the Department of Engineering Technology, Machine Tools and Tools. E-mail: grg-s1@mail.ru

Evgenia Antipova, Graduate Student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools. E-mail: antipova.ev.smr@yandex.ru