

УДК 621.923.5:62-472

И.М. Буюкли, канд. техн. наук, доц.,

В.М. Колесник, магистр,

Одес. нац. политехн. ун-т

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ХОНИНГОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ

**Введение.** Известно, что при хонинговании отверстий обеспечивается сравнительно высокое качество обработанной поверхности. Это — формирование регулярного рельефа в виде скрещающихся рисок, достаточно высокого уровня показатели физико-механических свойств поверхностного слоя и геометрической точности обрабатываемых отверстий. В частности, достигаемая геометрическая точность как в продольном, так и в поперечном сечениях лежит в пределах от нескольких микрон до десятых долей микрона. Указанные достоинства обеспечили достаточно широкое применение этого метода обработки в промышленности, и в некоторых случаях этот способ является единственно возможным для достижения требуемых параметров обработки.

**Анализ последних исследований и публикаций.** На практике, наиболее востребованной для реализации операций хонингования является конструкция инструмента, показанная на рис. 1, которая может быть использована для обработки как сквозных, так и глухих отверстий. Рабочая часть инструмента изображена применительно к случаю хонингования глухих отверстий с канавкой для выхода режущих элементов в зоне дна отверстия в крайнем верхнем (рис. 1, а) и крайнем нижнем (рис. 1, б) положениях.

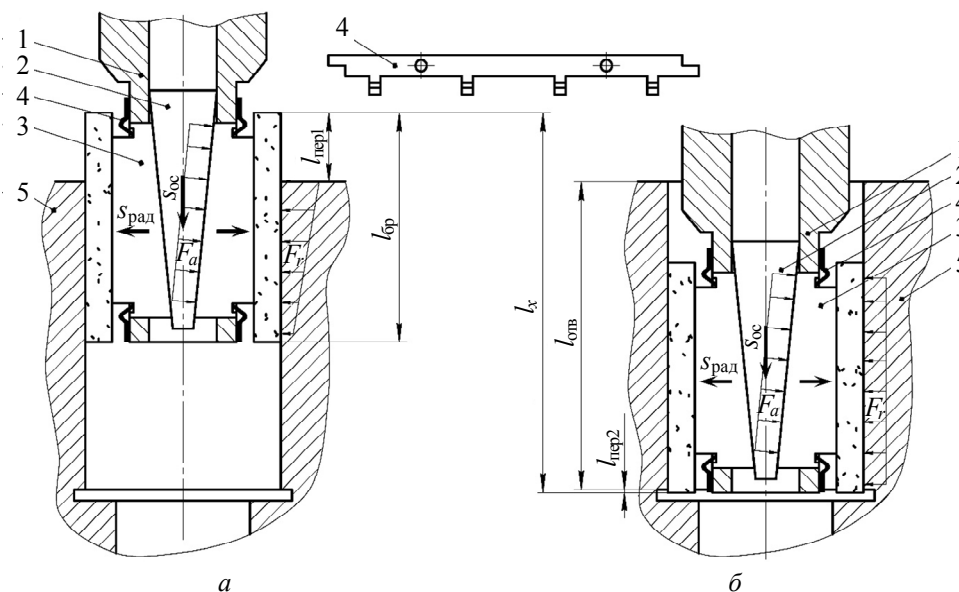


Рис. 1. Инструмент для хонингования отверстий: 1 — корпус, 2 — игла разжима, 3 — режущие элементы, 4 — плоская лепестковая пружина, 5 — обрабатываемая деталь;  $F_a$  — эпюра активных усилий,  $F_r$  — эпюра реактивных усилий,  $l_{отв}$  — длина хонингуемого отверстия,  $l_{бр}$  — длина режущих элементов инструмента,  $l_{пер1}$  и  $l_{пер2}$  — перебеги режущей части инструмента соответственно с одной и с другой стороны отверстия

DOI 10.15276/opu.1.45.2015.07

© И.М. Буюкли, В.М. Колесник, 2015

Заметим, что при наладке оборудования на соответствующую операцию хонингования сквозных отверстий величины части параметров наладки, непосредственно определяющих геометрическую точность обработки, выбирают из соотношений [1]

$$l_x = l_{отв} - l_{бр} + l_{пер1} + l_{пер2}, \quad (1)$$

$$l_{бр} = (1,2 \dots 0,8) l_{отв}, \quad (2)$$

$$l_{пер} = \left( \frac{1}{3} \dots \frac{3}{4} \right) l_{бр} = opt \quad (3)$$

и дополнительно, с целью обеспечения перекрытия хода режущих элементов (алмазонасных брусков),

$$l_{бр} = \frac{3\pi D \operatorname{tg} \alpha}{2z}, \quad (4)$$

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

где  $l_{отв}$  и  $D$  — соответственно длина и диаметр хонингуемого отверстия;

$l_{бр}$ ,  $B$  и  $z$  — соответственно длина, ширина и количество режущих элементов инструмента;

$\alpha$  — угол подъема траектории движения режущих элементов;

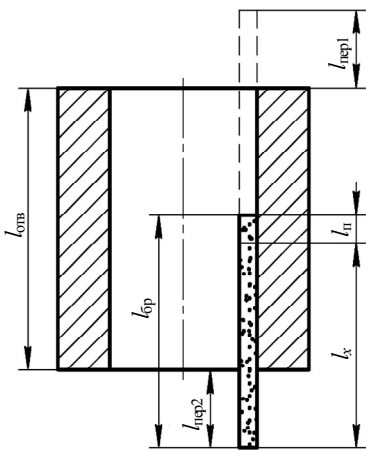
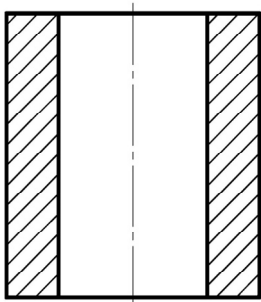
$l_{пер1}$  и  $l_{пер2}$  — перебеги режущей части инструмента соответственно с одной и с другой стороны отверстия.

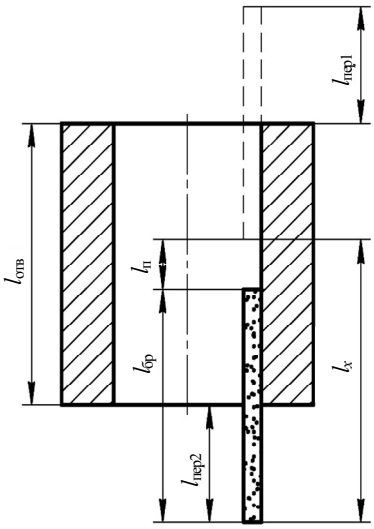
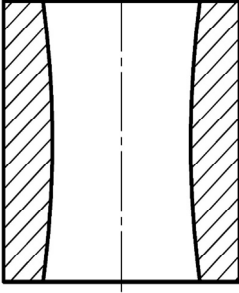
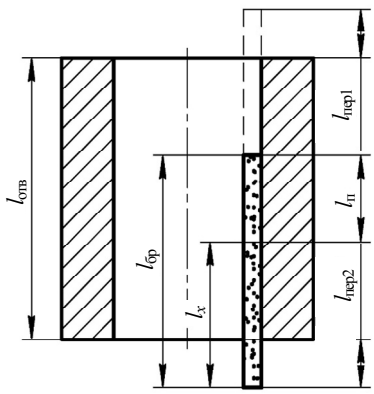
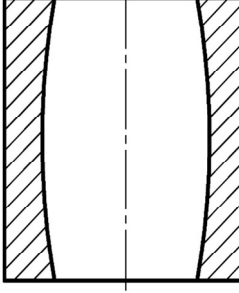
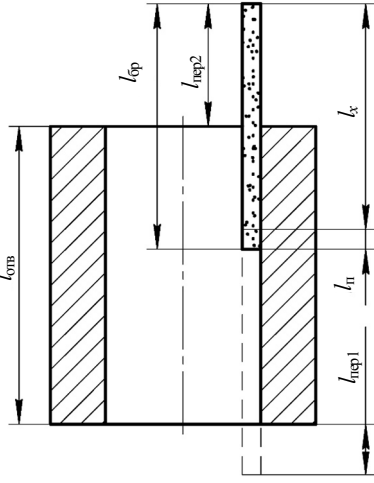
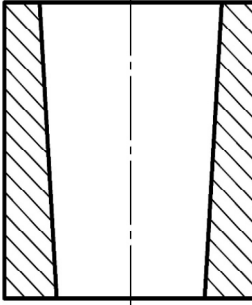
Оптимальное соотношение значений этих взаимосвязанных величин обеспечивает упомянутую выше достаточно высокую геометрическую точность. Однако, соблюдение указанных соотношений не всегда возможно по конструктивным признакам обрабатываемых отверстий. В частности, при хонинговании глухих отверстий в зоне дна обрабатываемого отверстия невозможно обеспечить оптимальную величину перебега.

Авторы работ по хонингованию, Б.Г. Левин, З.И. Кремень и др., исходя из практического опыта и достаточно большого объема экспериментальных исследований установили наиболее часто наблюдаемые погрешности формы обрабатываемого отверстия в продольном сечении в зависимости от величин перебега (табл. 1).

Таблица 1

Наблюдаемые погрешности формы обрабатываемого отверстия в продольном сечении

| № | Схема наладки $l_{бр} = 0,825 l_{отв}$                                              | Форма и вид погрешности продольного сечения                                                                                                      |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 |  |  <p><math>l_{пер1} = l_{пер2} \approx 1/3 l_{бр}</math></p> |

| № | Схема наладки $l_{бр} = 0,825 l_{отв}$                                              | Форма и вид погрешности продольного сечения                                                                                                                                                                                                        |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2 |    | <p data-bbox="970 324 1173 353">Седлообразность</p>  <p data-bbox="965 672 1181 705"><math>l_{пер1} = l_{пер2} \approx 1/2 l_{бр}</math></p>                     |
| 3 |   | <p data-bbox="970 795 1173 824">Бочкообразность</p>  <p data-bbox="965 1142 1181 1176"><math>l_{пер1} = l_{пер2} \approx 1/4 l_{бр}</math></p>                  |
| 4 |  | <p data-bbox="1002 1243 1141 1272">Конусность</p>  <p data-bbox="925 1590 1209 1624"><math>l_{пер1} \approx 1/4 l_{бр}; l_{пер2} \approx 1/2 l_{бр}</math></p> |

Авторы этих работ полагают, что изначальной доминирующей причиной формирования указанных в табл. 1 погрешностей является перераспределение контактных радиальных усилий, приложенных к опорным и режущим поверхностям режущих элементов, за время одного двойного хода.

Авторы ряда других работ по хонингованию [2...4] полагают, что изначальной доминирующей причиной формирования указанных в табл. 1 погрешностей является

неравномерный износ по длине режущих элементов. При этом рассматриваются интегральные величины неравномерности износа.

Однако, детальное рассмотрение того, как формируются соответствующие погрешности, по указанным выше изначальным доминирующим причинам в этих работах не приводится.

В связи с этим возникает необходимость рассмотрения причинно-следственной связи между величинами перебега и формирующейся при этом погрешности формы в продольном сечении за время одного двойного хода, в частности, при различных видах радиальной подачи.

**Целью работы** является повышение точности и расширение технологических возможностей на операциях хонингования отверстий и особо на операциях хонингования глухих отверстий.

**Изложение основного материала.** Поставленная цель достигается посредством анализа процесса формирования погрешностей за время элементарного цикла, равного времени одного двойного хода инструмента, и создания на этой основе нового способа хонингования.

В табл. 2, в первом приближении и на уровне формальной логики, схематично представлены результаты анализа причинно-следственной связи формирования погрешностей при условии, что изначальной доминирующей причиной является только перераспределение контактных радиальных усилий, воздействующих на опорные и режущие поверхности режущих элементов за время одного двойного хода.

Таблица 2

Результаты анализа причинно-следственной связи формирования погрешностей

| № | Схема контактных радиальных усилий на опорных поверхностях режущих элементов | Формирующиеся погрешности обработки в продольном сечении                       |
|---|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1 |                                                                              |                                                                                |
| 2 |                                                                              | <p>Седлообразность<br/><math>D'_1 = D_1</math>; <math>D'_2 &gt; D_2</math></p> |

| № | Схема контактных радиальных усилий на опорных поверхностях режущих элементов | Формирующиеся погрешности обработки в продольном сечении                                                     |
|---|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3 |                                                                              | <p>Седлообразность<br/> <math>D_1'' = D_1</math>; <math>D_2'' &gt; D_2' &gt; D_2</math></p>                  |
| 4 |                                                                              | <p>Седлообразность<br/> <math>D_1''' = D_1</math>; <math>D_2''' &gt; D_2'' &gt; D_2' &gt; D_2</math></p>     |
| 5 |                                                                              | <p>Конусность<br/> <math>D_1'''' = D_1</math>; <math>D_2'''' = D_2''</math>; <math>D_3'''' = D_2'</math></p> |

Из табл. 2 следует очевидный вывод о том, что при любых значениях перебегов неизбежно должна формироваться погрешность формы в продольном сечении в виде седлообразности, которая по мере увеличения величин перебега возрастает.

Если же, с учетом работ [2...4], изначальной доминирующей причиной считать неравномерность темпа износа по длине режущих элементов, то правомочно утверждать следующее.

В течение периода времени, равного одному двойному ходу, параметры процесса съема припуска меняются в достаточно широких пределах, т.е. величины силового воздействия и, соответственно, радиального износа алмазоносного слоя на различных участках по длине режущих элементов неодинаковы и переменны. Более того, при различных видах радиальной подачи процесс съема припуска и соответственно темп износа существенно отличаются.

Суть в том, что площадь контакта режущих элементов с обрабатываемой поверхностью и, соответственно, удельное давление по площади контакта за время одного двойного хода цик-

лически меняются. При этом средняя часть режущих элементов контактирует с обрабатываемой поверхностью постоянно и, соответственно, непрерывно изнашивается. Периферийные же части режущих элементов только часть времени контактируют с обрабатываемой поверхностью, а часть времени, которая соответствует времени перебега, не контактируют с обрабатываемой поверхностью и, соответственно, изнашиваются, но не непрерывно, а дискретно.

При хонинговании с радиальной подачей по давлению и с дозированной непрерывной радиальной подачей величины снимаемых припусков при поступательном и возвратном перемещении инструмента примерно одинаковы. При этом правомочны следующие утверждения.

Во время поступательного перемещения инструмента нижняя часть режущего элемента становится фронтальной и интенсивнее изнашивается, чем остальные (средняя и верхняя) части режущего элемента. Во время возвратного перемещения инструмента фронтальной становится верхняя часть режущего элемента, которая аналогично более интенсивно изнашивается, чем остальные (средняя и нижняя) части режущего элемента. Таким образом, при поступательном и возвратном перемещениях формируется погрешность формы инструмента в продольном сечении в виде бочкообразности.

Однако, сформированные таким образом интенсивно изношенные фронтальные части режущих элементов в то время, когда находятся вне зоны обработки (время перебега), в процессе съема припуска не участвуют и, соответственно, не изнашиваются.

Таким образом, с одной стороны формируется, как указывалось выше, погрешность формы инструмента в продольном сечении в виде бочкообразности, а с другой стороны — имеет место нивелирование этой бочкообразности за счет отсутствия износа фронтальных частей во время перебега.

Отсюда следует вывод о том, что можно выбрать величину перебегов таким образом, чтобы темп износа верхней фронтальной, нижней фронтальной и средней частей режущих элементов был одинаковым. Тогда, изнашиваясь, инструмент постоянно сохраняет форму предельно близкую к цилиндрической.

Изложенное для наглядности иллюстрируется табл. 3.

Таблица 3

Износ и форма инструмента

| № | Схема | Форма и вид погрешности продольного сечения |
|---|-------|---------------------------------------------|
| 1 |       |                                             |
| 2 |       |                                             |

| № | Схема | Форма и вид погрешности продольного сечения                        |
|---|-------|--------------------------------------------------------------------|
| 3 |       | <p>Бочкообразность</p> $D_2'' = D_2; D_1'' < D_1$                  |
| 4 |       | <p>Бочкообразность</p> $D_2''' = D_2; D_1''' < D_1'' < D_1' < D_1$ |
| 5 |       | <p>Конусность</p> $D_2'''' = D_2'; D_1'''' = D_1'''$               |

Сравнивая виды погрешностей в табл. 2 и 3 между собой и с погрешностями в табл. 1 видим, что при идентичных видах перебогов формирующиеся погрешности не идентичны, т. е. имеет место логическое противоречие.

Нетрудно понять, что если просуммировать соответствующие идентичным перебогам погрешности в табл. 2 и 3, то результирующая форма погрешности будет близкой к форме погрешности в табл. 1, т. е. отмеченное выше логическое противоречие устраняется.

На этом этапе рассмотрения можно сделать вывод о том, что форма генерируемой погрешности на операциях хонингования определяется двумя встречно направленными факторами, а именно: неравномерностью износа по длине режущих элементов и радиальной жесткостью рабочей части инструмента.

На основании вышеизложенного можно выделить следующее:

- при сравнительно малых величинах перебегов доминирующим фактором становится неравномерный износ по длине режущих элементов инструмента (доминирует форма погрешности в виде бочкообразности);
- при сравнительно больших величинах перебегов доминирующим фактором становится неравномерность жесткости по длине режущих элементов инструмента (доминирует форма погрешности в виде седлообразности);
- при оптимальных величинах перебегов доминирование факторов нивелируется и, соответственно, формируемая погрешность минимизируется.
- при ассиметричных нижнем и верхнем перебегах генерируется ассиметричная погрешность, близкая к конусообразности. При этом увеличение диаметрального размера конуса направлено в сторону большего перебега.

В настоящее время операции хонингования с радиальной подачей по давлению и непрерывной дозированной радиальной подачей применяются крайне редко по различным причинам. Существенно большее применение получила схема хонингования с дискретной дозированной радиальной подачей.

Далее рассмотрим процесс хонингования с дискретной дозированной радиальной подачей, которая в современных станках реализуется в момент реверса возвратного перемещения инструмента на поступательное, т.е. в крайнем верхнем положении инструмента.

В этом случае величины снимаемых припусков при поступательном и возвратном перемещениях в отличие от схем хонингования с подачей по давлению и дозированной непрерывной подачей существенно отличаются. Большая часть припуска удаляется при поступательном перемещении (процесс интенсивного резания), а меньшая часть — при возвратном (процесс выхаживания). Соответственно, при поступательном и возвратном перемещениях отличаются не только величины общего износа по длине режущих элементов, но и величины износа фронтальных частей, соответственно, нижней и верхней.

При хонинговании сквозных отверстий это обуславливает генерирование погрешности формы в продольном сечении в виде конусности. Очевидным в данном случае является то, что эту погрешность можно устранить, например, за счет увеличения величины нижнего перебега по отношению к верхнему (рис. 2).

**Результаты.** Таким образом, при традиционной схеме хонингования сквозных отверстий с подачей по давлению и дозированной непрерывной радиальной подачей величины нижнего и верхнего перебегов при наладке выбираются равными, а при хонинговании с дозированной дискретной радиальной подачей — величина нижнего перебега при наладке выбирается вынужденно большей, чем величина верхнего перебега.

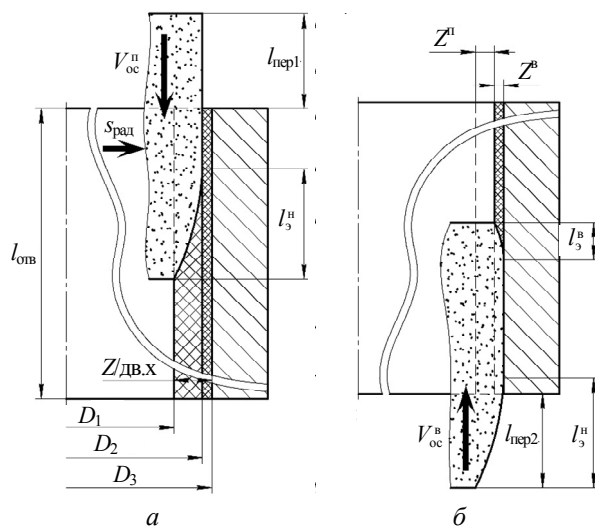


Рис. 2. Схема формирования фронтальных заборных частей режущих элементов при поступательном (а) и возвратном (б) перемещениях:  $D_1$  — диаметр хонингуемого отверстия после  $i$ -го возвратного перемещения режущего элемента,  $D_2$  — диаметр хонингуемого отверстия при  $i$ -ом поступательном перемещении режущего элемента,  $D_3$  — диаметр хонингуемого отверстия при  $i$ -ом возвратном перемещении режущего элемента,  $l_3^a$  — величина формирующейся заборной части при  $i$ -ом поступательном перемещении,  $l_3^b$  — величина формирующейся заборной части при  $i$ -ом возвратном перемещении,  $Z/\text{дв.х.}$  — припуск, снимаемый режущим элементом за один двойной ход,  $Z^a$  — припуск, снимаемый режущим элементом при  $i$ -ом поступательном перемещении,  $Z^b$  — припуск, снимаемый режущим элементом при  $i$ -ом возвратном перемещении,  $V_{oc}^a$  — поступательная скорость перемещения режущего элемента,  $V_{oc}^b$  — возвратная скорость перемещения режущего элемента

При хонинговании же глухих отверстий реализация двухстороннего перебега и большей величины перебега в зоне дна обрабатываемого отверстия (нижнего) невозможна из-за конструктивных особенностей таких отверстий. Это обуславливает неизбежность генерирования погрешности в виде конусности.

В связи с этим на основании анализа схем генерирования погрешности в продольном сечении разработан новый способ хонингования, в котором изменен цикл обработки, а именно: дозированная радиальная подача осуществляется в момент реверса возвратно-поступательного перемещения в зоне дна обрабатываемого отверстия [1].

Реализация дозированной подачи в зоне дна обрабатываемого отверстия в сравнении с известной схемой хонингования, когда дозированная подача реализуется в зоне, противоположной дну обрабатываемого отверстия, зеркально меняет интенсивность износа фронтальных частей, а именно, при возвратном перемещении инструмента имеет место более интенсивный съём припуска и, соответственно, более интенсивный износ соответствующей верхней фронтальной части режущих элементов по отношению к износу нижней фронтальной части режущего элемента за время поступательного перемещения. При этом за время перебега (реализуемого только в зоне, противоположной дну обрабатываемого отверстия) износ верхней части режущих элементов отсутствует, что компенсирует повышенный предшествующий износ. Таким образом, нивелируются величины износа верхней и нижней фронтальных частей, что, соответственно, обеспечивает более высокую точность обработки глухих отверстий.

Способ можно реализовать на известных станках за счет соответствующей незначительной модернизации системы управления станка. Например, достаточно связать команду на дозированный разжим режущих элементов с моментом реверса в зоне дна обрабатываемого отверстия.

#### **Выводы:**

— установлено, что с увеличением радиальной подачи увеличивается величина общего износа режущих элементов и, особо, их фронтальных частей, что приводит к формированию погрешности рабочей части инструмента в виде бочкообразности, которую возможно нивелировать за счет увеличения величины перебегов;

— при хонинговании сквозных отверстий по схеме с дозированной импульсной радиальной подачей половину общей величины радиальной подачи за один двойной ход необходимо осуществлять в момент реверса возвратного перемещения на поступательное, вторую половину — в момент реверса поступательного на возвратное;

— при хонинговании сквозных отверстий по схеме с дозированной импульсной радиальной подачей, реализуемой в крайнем верхнем положении (в момент реверса возвратного перемещения на поступательное), наладкой станка необходимо обеспечить соответствующую асимметрию перебегов: большую величину перебега в нижнем положении, меньшую — в верхнем;

— операции хонингования глухих отверстий следует осуществлять по схеме с импульсной дозированной радиальной подачей, реализуемой в зоне дна обрабатываемого отверстия.

#### **Литература**

1. Пат. 103959 Україна, МПК В24В 33/00. Спосіб хонінгування глухих отворів / Буюклі І.М., Колеснік В.М., Лінчевський П.А.; патентовласники Буюклі І.М., Колеснік В.М., Лінчевський П.А. — № а201207674; заявл. 10.12.2013; надр. 10.12.2013, Бюл. № 23.
2. Андреев, М.В. Повышение точности геометрической формы глухих отверстий при хонинговании / М.В. Андреев, А.М. Фирсов // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы 3-ей Всероссийской науч.-практ. конф., 25–26 сентября 2003 года, БТИ. — Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2003. — С. 143 — 147.
3. Андреев, М.В. Повышение точности геометрической формы отверстий в поперечном сечении при хонинговании / М.В. Андреев, А.М. Фирсов // Современные технологические системы в машиностроении (СТСМ – 2003): Сборник тезисов докладов международной науч.-техн. конф. — Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2003. — С. 9 — 10.
4. Пат. 2233216 Российская Федерация, МПК В24В 33/06. Способ хонингования / Фирсов А.М., Андреев М.В.; заявитель и патентообладатель Алтайский государственный технологический университет им. И.И. Ползунова. — № 2003110903/02; заявл. 16.04.2003; опубл. 27.07.2004, Бюл. № 21.

## References

1. Buiukli, I.M., Kolesnik, V.M. and Linchevskiy, P.A. (2013). *Blind hole honing method*. Ukraine Patent: UA 103959.
2. Firsov, A.M. and Andreev, M.V. (2003). Improving accuracy of the geometric forms of the blind holes during honing. In A.G. Ovcharenko (Ed.), *Proceedings of 3<sup>rd</sup> All-Russian Scientific-Practical Conference "Resource-Saving Technologies in Machine-Building"* (pp. 143-147). Biysk: Polzunov Altai State Technical University.
3. Firsov, A.M. and Andreev, M.V. (2003). Improving accuracy of the geometric forms of holes in the cross-section during honing. In *Proceedings of International Scientific and Technical Conference on Modern Technological Systems in Mechanical Engineering* (pp. 9-10). Barnaul: Polzunov Altai State Technical University.
4. Polzunov Altai State Technical University (2003). *Method of honing*. Russian Patent: RU 2233216.

## АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

*І.М. Буюклі, В.М. Колеснік. Підвищення точності хонінгування отворів.* На сьогодні в галузях точного машинобудування неухильно посилюються допуски на лінійні розміри і форми поверхонь деталей, що обробляються. Ці вимоги особливо актуальні при обробці отворів. Зокрема, в приладобудуванні, в деталях гідравлічних систем та ін. необхідна точність лінійних розмірів становить кілька мікрон, а точність форми — десятки частини мікрона. Метою даної роботи є підвищення точності і розширення технологічних можливостей хонінгування отворів і особливо хонінгування глухих отворів. На основі формальної логіки виконано аналіз формування похибок обробки шляхом розгляду схем нерівномірності розмірного зносу по довжині ріжучих елементів. Визначено можливості компенсації цієї нерівномірності і, відповідно, управління точністю обробки стосовно хонінгування як наскрізних, так і глухих отворів. Розроблено новий спосіб хонінгування, захищений патентом України на винахід. Спосіб може бути впроваджений як на існуючому верстатному устаткуванні при незначній модернізації його системи керування циклом обробки, так і на тому, що проектується.

*Ключові слова:* хонінгування, глухі отвори, наскрізні отвори, точність форми поздовжнього перерізу, подвійний хід, припуски, перебіги.

*И.М. Буюкли, В.М. Колесник. Повышение точности хонингования отверстий.* В настоящее время в отраслях точного машиностроения неуклонно ужесточаются допуски на линейные размеры и формы поверхностей обрабатываемых деталей. Эти требования особо актуальны при обработке отверстий. В частности, в приборостроении, в деталях гидравлических систем и др. требуемая точность линейных размеров составляет несколько микрон, а точность формы — десятые доли микрона. Целью данной работы является повышение точности и расширение технологических возможностей хонингования отверстий и особенно хонингования глухих отверстий. На основе формальной логики выполнен анализ формирования погрешностей обработки путем рассмотрения схем неравномерности размерного износа по длине режущих элементов. Определены возможности компенсации этой неравномерности и, соответственно, управления точностью обработки применительно к хонингованию как сквозных, так и глухих отверстий. Разработан новый способ хонингования, защищенный патентом Украины на изобретение. Способ может быть внедрен как на существующем станочном оборудовании при незначительной модернизации его системы управления циклом обработки, так и на вновь проектируемом.

*Ключевые слова:* хонингование, глухие отверстия, сквозные отверстия, точность формы продольного сечения, двойной ход, припуски, перебеги.

*I.M. Buiukli, V.M. Kolesnik. Improving accuracy of holes honing.* Currently, in precision engineering industry tolerances for linear dimensions and tolerances on shape of surfaces of processing parts are steadily tightened. These requirements are especially relevant in processing of holes. Aim of the research is to improve accuracy and to enhance the technological capabilities of holes honing process and, particularly, of blind holes honing. Based on formal logic the analysis of formation of processing errors is executed on the basis of consideration of schemes of irregularity of dimensional wear and tear along the length of the cutting elements. With this, the possibilities of compensating this irregularities and, accordingly, of control of accuracy of processing applied to the honing of both throughout and blind holes are specified. At the same time, a new method of honing is developed, it is protected by the patent of Ukraine for invention. The method can be implemented both on an existing machine tools at insignificant modernization of its system of processing cycle control and on newly designed ones.

*Keywords:* honing, blind holes, throughout holes, shape accuracy of longitudinal section, double stroke, oversizes, overtravels.

Поступила в редакцию 10 февраля 2015 г.