

УДК 621. 923. 5

И.М. Буюкли, канд. техн. наук, доц.,  
В.М. Колесник, магистр,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## ТОЧНОСТЬ ПРИ ХОНИНГОВАНИИ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ

*И.М. Буюкли, В.М. Колесник. Точність при хонінгуванні глухих отворів.* Виконано аналіз процесу хонінгування глухих отворів інструментом, що забезпечує компенсацію розмірного зносу ріжучих елементів з урахуванням нерівномірності їх зносу по довжині. За підсумками аналізу виявлено можливості модернізації відомого інструменту з метою підвищення ефективності процесу хонінгування.

*Ключові слова:* хонінгування, глухі отвори, точність форми, компенсація зносу.

*И.М. Буюкли, В.М. Колесник. Точность при хонинговании глухих отверстий.* Выполнен анализ процесса хонингования глухих отверстий инструментом, обеспечивающим компенсацию размерного износа режущих элементов с учетом неравномерности их износа по длине. На основе анализа выявлены возможности модернизации известного инструмента с целью повышения эффективности процесса хонингования.

*Ключевые слова:* хонингование, глухие отверстия, точность формы, компенсация износа.

*I.M. Boukli, V.M. Kolesnik. Accuracy in honing blind holes.* The analysis of the process of honing blind holes with the instrument providing compensation of dimensional wear of cutting elements, taking into account the uneven wear on their length, is conducted. Based on the analysis, the possibilities of upgrading the known tool to improve the efficiency of the honing process are identified.

*Keywords:* honing, blind holes, the accuracy of the form, wear compensation.

В известных схемах хонингования процесс съема припуска осуществляется при вращательном, возвратно-поступательном и радиальном относительных движениях алмазосных элементов инструмента и хонингуемой детали. При этом длина (амплитуда) возвратно-поступательного движения выбирается из соотношения

$$L_H = L - l + l_1 + l_2, \quad (1)$$

где  $L$ ,  $l$ ,  $l_1$  и  $l_2$  — соответственно длины хонингуемого отверстия, алмазосных элементов, перебегов рабочей части алмазосных элементов с одной и с другой стороны отверстия.

Все эти величины взаимно связаны, а оптимальные соотношения их значений обеспечивают высокую геометрическую точность.

В частности, при хонинговании сквозных отверстий рекомендуются следующие соотношения:  $l \approx (0,8...1)L$ ;  $l_1 \approx l_2 \approx l/3$ .

При хонинговании глухих отверстий обеспечить указанные соотношения невозможно, а именно, невозможно реализовать требуемый оптимальный перебег в зоне дна обрабатываемого отверстия. Хонингование таких отверстий с односторонним перебегом (либо с превалирующим односторонним перебегом) приводит к тому, что величина радиального износа рабочей (режущей) части алмазосных элементов по длине неодинакова. Радиальный износ в той части алмазосных элементов, где имеет место больший перебег, существенно меньше, чем в той части, где перебег меньше (либо отсутствует). Это обуславливает появление на рабочей части инструмента геометрической погрешности в виде конусности, которая формирует соответствующую продольную геометрическую погрешность в хонингуемом отверстии изделия.

Разработка новых схем хонингования и конструкций хонинговальных головок, направленных на повышение геометрической точности при хонинговании глухих отверстий, осуществляется по следующим направлениям:

- варьирование интенсивностью и временем съема припуска по длине обрабатываемого отверстия;
- формирование переменной размерной износостойкости по длине режущих элементов;
- введение компенсационных перемещений режущих элементов в соответствии с их размерным износом.

Целью данной работы является анализ процесса съема припуска и износа режущих элементов при хонинговании известной конструкцией инструмента [1], обеспечивающей компенсацию неравномерного размерного износа по длине режущих элементов, и разработка на этой основе рекомендаций по созданию более совершенной схемы и конструкции инструмента для хонингования высокоточных глухих отверстий.

Схема конструкции известного инструмента приведена на рис. 1.

Инструмент состоит из корпуса 1, в продольных радиальных пазах которого установлены подвижно с возможностью поворота вокруг оси 7 и контакта с рабочей частью 3 иглы разжима 2, подпружиненные пружиной 8 колодки 4, 6 с алмазосносным слоем 5. Игла разжима 2 установлена соосно корпусу с возможностью продольного перемещения посредством механизма радиальной подачи станка (на рисунке не изображен).

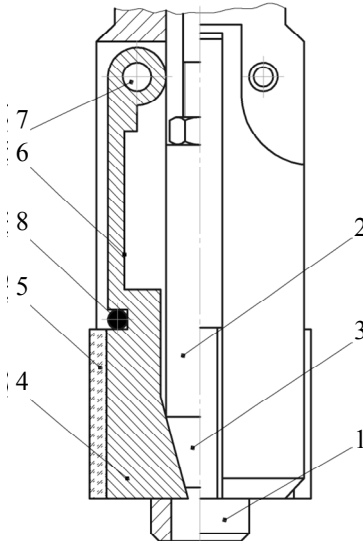


Рис. 1. Схема конструкции известного инструмента

Схема конструкции известного инструмента, изображенного на рисунке 1, с оптимальным вариантом взаимного расположения иглы разжима и колодки с алмазосносным слоем в момент окончания съема припуска  $z$  в отверстии изделия 9 представлена на рис. 2. При этом рабочая часть иглы разжима контактирует (сопрягается) с опорной поверхностью колодки по прямой линии  $AB$ , а рабочая поверхность алмазосносного слоя контактирует с обработанной поверхностью изделия по образующей  $CD$ . Этот вариант является необходимым условием для достижения высокой геометрической точности обрабатываемого отверстия в продольном сечении.

Обозначения на рисунках 1...4 идентичны:

$R$  — значение вертикальной координаты оси поворота режущих элементов;

$l$  — длина алмазосносного слоя;

$2\varphi$  — угол при вершине рабочей части (конической либо клиновидной) иглы разжима;

$\alpha$  — требуемый компенсационный угол доворота за время съема припуска;

$\beta$  — фактический угол поворота режущих элементов за время съема припуска;

$z$  — снимаемый припуск;

$\Delta_{\text{ср}}$  — средний удельный износ режущих элементов;

$\alpha_{\text{max}}$  — предельное значение компенсационного угла доворота.

На рис. 3 изображено взаимное расположение инструмента и обрабатываемого изделия в момент начала съема припуска с учетом условия оптимальности их расположения в момент окончания съема припуска. При этом рабочая (коническая либо клиновидная) часть иглы разжима контактирует (сопрягается) с опорной поверхностью колодки в точке  $B$  (а не по линии  $AB$ ). Рабочая поверхность алмазосносного слоя контактирует с образующей необработанной поверхности отверстия изделия в точке  $M$ , а не по линии  $MN$ .

Инструмент работает следующим образом.

До начала обработки определяют положение иглы разжима (положение алмазосносных элементов), соответствующее требуемому диаметральному размеру отверстия в хонингуемых изделиях. Это может быть осуществлено, например, по эталонной детали. Затем переводят инструмент в исходное положение.

В исходном положении инструмент находится вне хонингуемого отверстия; игла разжима находится в крайнем верхнем положении (см. рисунок 3) и соответственно колодки с алмазо-

носным слоем сжаты пружиной до минимального диаметра. Инструмент вводится в обрабатываемое отверстие, и посредством соответствующих приводов осуществляется возвратно-поступательное, вращательное и ускоренные радиальные перемещения режущих элементов. В момент достижения контакта режущих элементов с обрабатываемой поверхностью системой управления станка ускоренное радиальное перемещение режущих элементов переключается на рабочую подачу, и далее осуществляется съём припуска. По окончании съёма припуска инструмент выводится из отверстия в исходное крайнее положение.

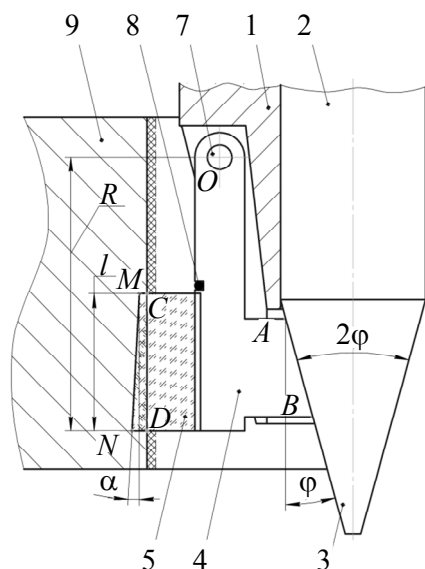


Рис. 2. Схема известной конструкции инструмента с оптимальным вариантом взаимного расположения подвижных частей инструмента и обрабатываемого изделия в момент окончания съёма припуска

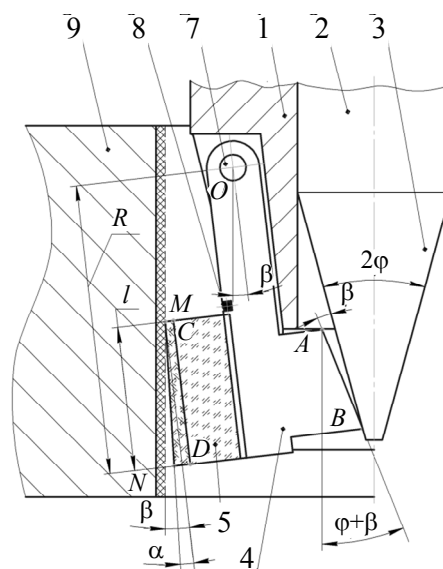


Рис. 3. Схема взаимного расположения обрабатываемого изделия и подвижных частей инструмента, изображенного на рис.2, в момент начала съёма припуска

При этом в процессе съёма припуска алмазоносный слой неизбежно изнашивается (на рисунке 2 изношенный слой обозначен контуром  $CDMN$ ), и в случае хонингования глухих отверстий, в связи с асимметричностью перебега, нижняя часть алмазоносного слоя (величина  $DN=\Delta_H$ ) изнашивается интенсивней, чем верхняя (величина  $CM=\Delta_B$ ). Эта разница износов, с учетом длины алмазоносного слоя  $l$ , определяет величину необходимого компенсационного угла доворота  $\alpha$  за время обработки одного отверстия.

Видно, что по мере съёма припуска и износа алмазоносного слоя и в зависимости от конструктивного исполнения инструмента возможны четыре варианта контакта рабочей части иглы разжима с опорной частью колодки с алмазоносным слоем (см. рисункм 2 и 3). Это — контакт либо только в точке  $B$ , либо только в точке  $A$ , либо в начале съёма припуска контакт в точке  $B$ , а в конце съёма припуска — контакт по линии  $AB$  или в точке  $A$ .

Из изложенного следует, что при равномерном перемещении иглы разжима радиальная подача каждого режущего зерна будет различной и переменной, а в момент перехода контакта от точки  $B$  к точке  $A$  будет иметь место скачкообразное изменение радиальной подачи. Иными словами, режущие зерна будут либо перегружены, либо недогружены, т.е. режущие зерна будут работать в режиме, отличном от оптимального.

Также непосредственно видно, что в момент начала обработки отсутствует полное прилегание режущего элемента и образующей необработанного отверстия, т.е. изначально съём припуска осуществляется только частью режущих зерен в окрестности точки  $M$ .

Далее зона износа будет смещаться от точки  $M$  к точке  $N$ , что обусловит бочкообразный износ режущих элементов. В результате этого бочкообразная форма инструмента будет форми-

ровать соответствующую геометрическую погрешность обрабатываемого отверстия, и по мере осуществления радиальной подачи число режущих зерен будет увеличиваться, но полное прилегание образующей режущего элемента и образующей обрабатываемого отверстия при этом недостижимо, т.е. будет иметь место частичный контакт режущих элементов с обрабатываемой поверхностью.

Предположим, что можно сконструировать инструмент и организовать процесс съема припуска таким образом, чтобы фактический угол поворота режущих элементов  $\beta$ , который, по сути, является производным от величины снимаемого припуска и величины среднего удельного износа алмазного слоя, был равен требуемому компенсационному углу доворота  $\alpha$ .

Это — оптимальное условие съема припуска, при котором имеет место полное прилегание образующих режущего элемента и обрабатываемого отверстия от начала и до конца съема припуска.

Расчетная схема оптимального варианта съема припуска известным инструментом представлена на рис. 4.

Непосредственно видно, что при изменении положения координаты оси поворота режущего элемента  $O$  меняется и величина угла  $\beta$ , т.е. если определено значение угла  $\alpha$ , то можно обеспечить равенство углов  $\alpha$  и  $\beta$ , например, за счет соответствующего конструктивного выбора координат оси поворота  $O$  режущего элемента (см. рисунки 3 и 4). Элементарными геометрическими построениями можно показать, что варьирование координатой оси поворота  $O$  в горизонтальном направлении малоэффективно.

Ось поворота  $O$  режущего элемента по горизонтали зафиксирована таким образом, что делит пополам сумму средних величин снимаемого припуска и удельного износа алмазного слоя (см. рисунок 4). В этом случае ввиду малости углов  $\alpha$  и  $\beta$ , с целью упрощения математических выкладок, возможна замена дуг окружностей, по которым перемещаются режущие зерна, на хорды этих окружностей.

Непосредственно из геометрических построений следует, что

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{(z + \Delta_{\text{cp}})/2}{(R - l/2)}, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} 2 \cdot \frac{\alpha}{2} = \frac{\Delta_{\text{H}} - \Delta_{\text{B}}}{l} = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}. \quad (3)$$

Решая уравнения (3) относительно  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ , получим

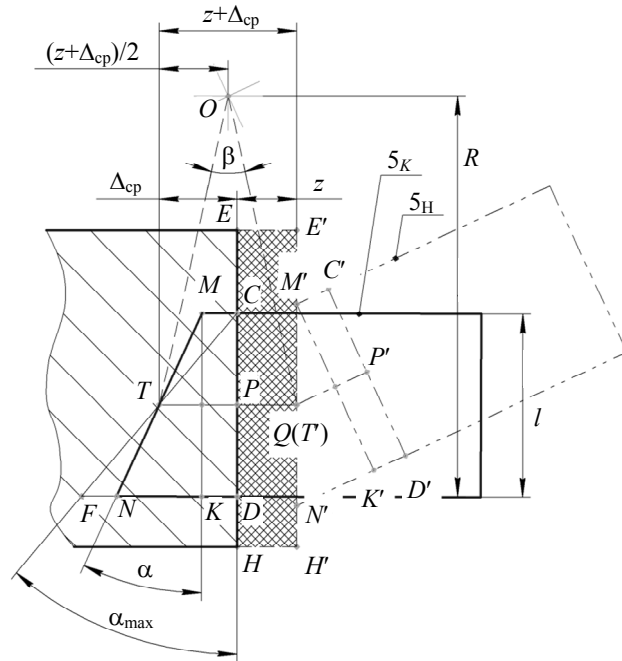


Рис. 4. Расчетная схема оптимального варианта взаимного расположения алмазного слоя инструмента и обрабатываемого изделия в момент начала съема припуска ( $5_{\text{H}}$ ) и в момент окончания съема припуска ( $5_{\text{K}}$ )

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = -\frac{l}{\Delta_H - \Delta_B} \pm \sqrt{\frac{l^2}{(\Delta_H - \Delta_B)^2} - 1}. \quad (4)$$

Из условия  $\alpha = \beta$  следует

$$-\frac{l}{\Delta_H - \Delta_B} \pm \sqrt{\frac{l^2}{(\Delta_H - \Delta_B)^2} - 1} = \frac{(z + \Delta_H - \Delta_B)/2}{(R - l/2)}. \quad (5)$$

Отсюда

$$R = \frac{1}{\Delta_H - \Delta_B} \cdot \left( -\frac{l}{2} \pm \sqrt{l^2 - (\Delta_H - \Delta_B)^2} \right) + \frac{l \cdot \left( z + \frac{\Delta_H - \Delta_B}{2} \right)}{z + \frac{\Delta_H - \Delta_B}{2}}. \quad (6)$$

Таким образом, получено уравнение для определения в известном инструменте значения вертикальной координаты угла поворота режущего элемента, при котором обеспечивается оптимальный съем припуска. Из этого уравнения (и из геометрических построений рисунка 4) видно, что конструктивный параметр  $R$  при фиксированных значениях  $l$  и  $z$  (и учета условия  $\alpha = \beta$ ) является производным и зависит от значений  $\Delta_H$  и  $\Delta_B$ , которые при конкретных условиях обработки могут быть определены экспериментально. Если перейти к предельному максимальному значению разности  $\Delta_H - \Delta_B$  ( $\Delta_H \rightarrow \max$ ;  $\Delta_B \rightarrow 0$ ), то получим максимальное значение угла  $\alpha_{\max}$ , которое соответствует минимальному значению конструктивного параметра  $R$ . В этом случае, если величину разности  $(\Delta_H - \Delta_B)$  заменить величиной  $2\Delta_{\text{CP}}$  (отрезок  $FD=2TP=2\Delta_{\text{CP}}$ ), то можно воспользоваться инвариантными экспериментальными данными по удельному среднему износу режущих элементов. Воспользуемся данными, которые получены при черновом и чистовом хонинговании гильз из легированного чугуна (см. таблицу) [2].

*Удельный износ алмазного слоя при черновом и чистовом хонинговании гильз из легированного чугуна*

Деталь, материал, размер	Операция	Характеристика брусков*	Припуск, мм	Режимы резания			Шероховатость, Ra	Стойкость комплекта брусков в деталях, шт.
				$V_{\text{В.П.}}$	$V_{\text{КР}}$	$P$ , мПа		
				м/мин				
Гильза, легированный чугун, HRCэ 45, $\varnothing 145^{+0,05}$ мм, $L=280$ мм	1	АСВ 160/125 М1	0,03...0,17	18	34	$P_1=0,4$ $P_2=2,5$ $P_1=0,4$	2,5	800...600
	2	АСМ 20/40 М1	0,01	9	49	—	0,32	1500...2000

Исходя из этих данных, определим ориентировочные значения  $\Delta_{\text{CP}}$ :

— при черновом хонинговании  $\Delta_{\text{CP}} = \frac{1,5}{800} = 0,001875$  мм/дет.;

— при чистовом хонинговании  $\Delta_{\text{CP}} = \frac{1,5}{1500} = 0,001$  мм/дет.

Подставляя эти данные в уравнение (6), получим ориентировочные значения вертикальных координат углов поворота режущего элемента соответственно в конструкциях головок для чернового и чистового хонингования:  $R_{\text{черн.}}=330299,9$  мм;  $R_{\text{чист.}}=5952443$  мм.

Реальные значения  $R$  (с учетом того, что  $\alpha \ll \alpha_{\max}$ ) будут существенно больше, предположительно на порядок и более. Очевидно, что конструкция с длиной рабочей части более 330 м неприемлема.

\* Размеры брусков 125×8×3,5×1,5 R72.5.

Исходя из изложенного можно сделать следующие выводы.

В известную конструкцию заложена прогрессивная идея компенсации по мере съема припуска размерного износа с учетом неравномерности этого износа по длине режущих элементов.

Известная конструкция не может обеспечить оптимальный процесс съема припуска, а именно производительный съем припуска всеми режущими зернами по длине режущих элементов за время цикла. Это обусловлено тем, что величины радиальной подачи и компенсационного угла поворота режущих элементов функционально взаимозависимы.

Поэтому можно сформулировать обобщающий вывод: известную конструкцию следует модернизировать таким образом, чтобы исключить функциональную зависимость радиальной подачи и компенсационного угла поворота режущих элементов. Это позволит существенно расширить технологические возможности процесса хонингования глухих отверстий.

### Литература

1. Андреев, М.В. Повышение производительности хонингования глухих отверстий путем оптимизации режимов обработки и конструктивных параметров инструмента: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / М.В. Андреев. — Бийск, 2005. — 159с.
2. Холмогорцев, Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий / Ю.П. Холмогорцев. — М.: Машиностроение, 1984 — 184 с.

### References

1. Andreev, M.V. Povyshenie proizvoditel'nosti khoningovaniya glukhikh otverstiy putem optimizatsii rezhimov obrabotki i konstruktivnykh parametrov instrumenta: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.08 [Improving the productivity blind hole honing by optimizing the process rates and structural dimensions of the tool: thesis...cand. tech. sci.:05.02.08] / M. V. Andreev. — Biysk, 2005. — 159 p.
2. Kholmogortsev, Yu.P. Optimizatsiya protsessov obrabotki otverstiy [Optimization of hole machining processes] / Yu.P. Kholmogortsev. — Mashinostroenie [Machine Building], 1984. — 184 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Лебедев В.Г.

Поступила в редакцию 1 июля 2013 г.