

**Ф.В. НОВИКОВ**, д-р. техн. наук, проф., ХНЭУ, Харьков;  
**И.А. РЯБЕНКОВ**, канд. техн. наук, ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков;  
**В.С. ДЕРЯБИН**, канд. техн. наук, ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков.

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗНОГО РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ГИДРОАППАРАТУРЫ**

У роботі теоретично та експериментально обґрунтована ефективність застосування алмазних різців замість твердосплавних різців на операціях розточування бронзових втулок, використовуваних у деталях гідроапаратури, а також ефективність застосування процесу розточування отвору діаметром 6 мм у магнітному кільці твердістю HRC 62-63 замість процесу внутрішнього шліфування

In-process in and experimentally theory efficiency of application of diamond chisels is grounded instead of hard-alloy chisels on the operations of boring of bronze hobs, in-use in the details of hidroapparatury, and also efficiency of application of process of the rasta-chivaniya opening by a diameter 6 mm in a magnetic ring by hardness of HRC 62-63 instead of process of the internal polishing

В работе теоретически и экспериментально обоснована эффективность применения алмазных резцов взамен твердосплавных резцов на операциях растачивания бронзовых втулок, используемых в деталях гидроаппаратуры, а также эффективность применения процесса растачивания отверстия диаметром 6 мм в магнитном кольце твердостью HRC 62-63 взамен процесса внутреннего шлифования

Ключевые слова: Детали гидроаппаратуры, растачивание отверстия, алмазный инструмент, энергоёмкость обработки, точность обработки

**Постановка проблемы.** Изготовление высокоточных деталей гидроаппаратуры, выполненных из труднообрабатываемых материалов, требует применения эффективных наукоемких технологий механической обработки, обеспечивающих высокие показатели качества и производительности. Одним из наиболее перспективных направлений в этом плане является резание инструментами из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ), которые обладают высокой твердостью, износостойкостью и теплопроводностью и позволяют существенно снизить силовую и тепловую напряженность процессов обработки различных по физико-механическим свойствам материалов: от пластичной меди до самого твердого в природе материала – алмаза [1,2]. Практикой установлено, что применение алмазных резцов на ряде операций обработки деталей гидроаппаратуры авиационного назначения позволяет повысить производительность и качество обработки и открывает новые технологические возможности их высококачественного изготовления. Поэтому целью работы является определение технологических возможностей эффективного использования инструментов из СТМ на финишных операциях обработки высокоточных деталей гидроаппаратуры.

**Основная часть.** Наиболее сложной в изготовлении является ответственная деталь гидроаппаратуры – блок цилиндров, выполненный из стали 7ХГ2ВМФ твердостью HRC 51...56 и содержащий 9 глухих отверстий, к точности обработки которых предъявляются высокие требования. Данные отверстия обрабатываются под диффузионное сваривание с втулками из бронзы Бр 010С2НЗ твердостью  $HB \geq 75$ . Традиционная технология включает растачивание отверстий и их последующее хонингование. Однако при этом не обеспечивается стабильно отклонение от цилиндричности в пределах 0,01 мм. Применение фрезерования твердосплавными концевыми фрезами отверстий на современном высокооборотном станке с ЧПУ мод. "Рисомах-60М" позволило решить данную проблему [3,4]. Вместе с тем, как показывает практика, существенным недостатком высококачественного изготовления блока цилиндров является низкая точность обработки отверстий в бронзовых втулках.

Согласно действующей технологии обработки отверстий в бронзовых втулках, первоначально производится их растачивание резцом из твердого сплава ВК8 с обеспечением погрешности формы обрабатываемой поверхности в пределах 10 мкм и шероховатости поверхности  $R_a = 1,25$  мкм. Затем отверстие обрабатывается рейберами (методом пластического деформирования металла на фрезерном станке), что уменьшает погрешность формы обрабатываемой поверхности до 3-х мкм. После этого применяется доводка текстолитовым притиром пастой КТ. Данная технология характеризуется достаточно высокой трудоемкостью обработки, что связано в первую очередь с относительно низкими показателями точности обработки, достигаемыми на операции растачивания отверстий твердосплавным резцом на токарно-винторезном станке мод. 16К20. Для улучшения этих показателей приходится применять трудоемкий процесс рейберования. В связи с этим предложено на операции растачивания вместо твердосплавных резцов использовать алмазные резцы и обработку производить на высокооборотном обрабатывающем центре мод. "Рисомах-60М" ( $n = 8000$  об/мин;  $S = 0,03$  мм/об; снимаемый припуск при черновой обработке – 0,2 мм, а при чистовой обработке – 0,05 мм; количество проходов – 2).

Эффективность применения алмазных инструментов, как известно, обусловлена прежде всего низким коэффициентом трения  $f$  алмаза с обрабатываемым материалом, что согласно формуле проф. Зворыкина К.А., приводит к увеличению условного угла сдвига материала  $\beta = 45^\circ + (\gamma - \psi) / 2$ , где  $\gamma$  – передний угол инструмента;  $\psi$  – условный угол трения образующейся стружки с передней поверхностью инструмента ( $tg \psi = f$ ). Это создает эффективные предпосылки снижения силовой и тепловой напряженности процесса резания, т.к. энергоемкость обработки (условное напряжение резания)  $\sigma$  связана с углом  $\beta$  зависимостью [5]:  $\sigma = \sigma_{сж} / tg \beta$ , где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, МПа. Из зависимости сле-

дует, что чем больше угол  $\beta$ , тем меньше  $\sigma$  и соответственно тангенциальная  $P_z = \sigma \cdot S$  и радиальная  $P_y = \sigma \cdot S / K_{рез}$  составляющие силы резания, где  $S$  – площадь поперечного сечения среза,  $m^2$ ;  $K_{рез} = P_z / P_y = ctg(\psi - \gamma)$  – коэффициент резания. Между энергоемкостью обработки  $\sigma$  и коэффициентом резания  $K_{рез}$  существует связь [5]:  $\sigma = \sigma_{сж} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right) / K_{рез}$ . Поэтому тангенциальная  $P_z = \sigma \cdot S$  и радиальная  $P_y = \sigma \cdot S / K_{рез}$  составляющие силы резания в конечном итоге могут быть выражены через коэффициент резания  $K_{рез}$  в соответствии с зависимостями:  $P_z = \frac{\sigma_{сж} \cdot S}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right)$ ;  $P_y = \frac{\sigma_{сж} \cdot S}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right)$ . Как видно, составляющие силы резания вполне однозначно определяются коэффициентом резания  $K_{рез}$ . С его увеличением они уменьшаются, причем, радиальная  $P_y$  составляющая силы резания – с большей интенсивностью. Поэтому основным путем уменьшения составляющих силы резания является уменьшение  $K_{рез}$ .

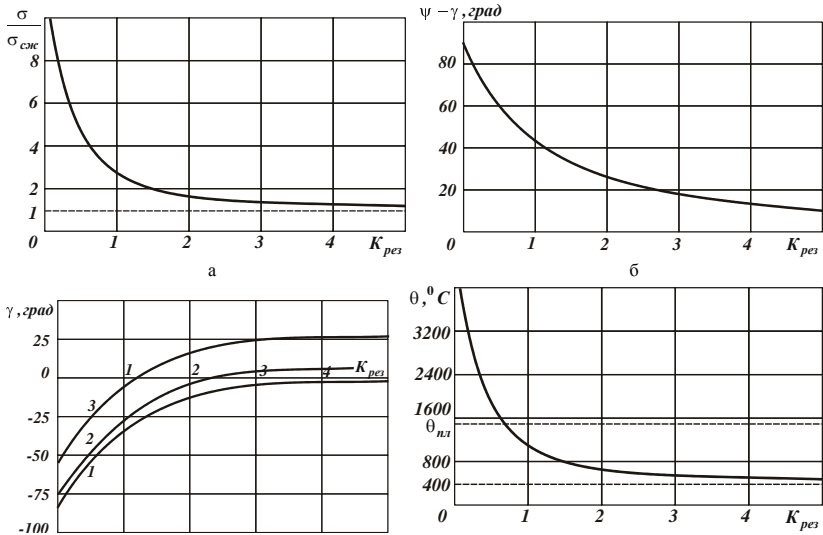


Рис. 1. Зависимости отношения  $\sigma / \sigma_{сж}$  (а), угла  $\psi - \gamma$  (б), переднего угла инструмента  $\gamma$  (в) и температуры резания  $\theta$  (г) от коэффициента резания  $K_{рез}$ : 1 –  $\psi = 10^0$  ( $f = 0,176$ ); 2 –  $\psi = 20^0$  ( $f = 0,364$ ); 3 –  $\psi = 40^0$  ( $f = 0,839$ ); обрабатываемый материал – сталь ШХ15.

Расчетами установлено, что с увеличением  $K_{рез} \rightarrow 10$  энергоёмкость обработки  $\sigma$  уменьшается фактически до значения  $\sigma_{сжс}$  (рис. 1,а). Увеличить  $K_{рез} = P_z / P_y = ctg(\psi - \gamma)$  можно уменьшением разности углов  $(\psi - \gamma)$ , рис. 1,б.

Для алмаза коэффициент трения  $f$  может принимать значение 0,1. Тогда условный угол трения  $\psi$  образующейся стружки с передней поверхностью инструмента (исходя из зависимости  $tg \psi = f$ ) равен  $6^\circ$ , а коэффициент резания  $K_{рез}$  (при  $\gamma = 0$ ) – равен 10. Это указывает на то, что при резании алмазным инструментом может быть реализовано условие  $\sigma \rightarrow \sigma_{сжс}$ , при котором толщина среза фактически равна толщине стружки, а разрушение обрабатываемого материала подчиняется условию разрушения материала на сжатие. Таким образом показано, что применение алмазного инструмента потенциально позволяет реализовать минимальную энергоёмкость обработки  $\sigma$  при нулевом и даже отрицательном переднем угле инструмента  $\gamma$  (рис. 1,в). В результате достигается двойной эффект обработки: уменьшается силовая напряженность процесса резания и появляется возможность повышения прочности режущего клина инструмента и его износостойкости за счет применения нулевого и даже отрицательного переднего угла  $\gamma$ . Кроме того, уменьшение энергоёмкости обработки  $\sigma$  ведет к уменьшению температуры резания  $\theta = \sigma \cdot z / c \cdot \rho$  [6], где  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – относительная величина температуры, изменяется в пределах 0...1 и определяется из уравнения  $\bar{l}_1 = c \cdot \rho \cdot a \cdot V \cdot tg\beta / \lambda = -ln(1-z) - z$ ;  $\bar{l}_1$  – безразмерная величина;  $a$  – толщина среза, м;  $V$  – скорость резания, м/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К).

Расчетами установлено, что с увеличением параметров  $a, V$  и  $\beta$  относительная величина температуры  $z$  увеличивается, асимптотически приближаясь к значению  $z \rightarrow 1$  (рис. 2). Следовательно, чем меньше условный угол сдвига материала  $\beta$ , тем меньше относительная величина температуры  $z$  и соответственно температуры резания  $\theta$ . Из этого вытекает, что при резании алмазным инструментом, вследствие уменьшения условного угла сдвига материала  $\beta$ , появляется возможность уменьшения величины  $z$  и температуры резания  $\theta$ . Это также позволяет увеличить скорость резания  $V$  и соответственно производительность обработки при заданном значении температуры резания  $\theta$ . Таким образом показано, что уменьшение температуры резания  $\theta$  происходит по двум каналам: путем уменьшения энергоёмкости обработки  $\sigma$  и уменьшения относительной величины температуры  $z$ , хотя в обоих случаях первопричиной уменьшения  $\theta$  является уменьшение условного угла

сдвига материала  $\beta$  (определяющего параметры  $\sigma$  и  $z$ ).

При существенном увеличении скорости резания  $V$  относительная величина температуры  $z \rightarrow 1$ . Тогда зависимость для определения температуры резания  $\theta$  принимает упрощенный вид  $\theta = \sigma / c \cdot \rho$ . На рис. 1,г приведены рассчитанные по данной зависимости значения температуры резания  $\theta$  с учетом значений  $\sigma$ , графически представленных на рис. 1,а. Как видно, с увеличением коэффициента резания  $K_{рез}$  температура резания  $\theta$  непрерывно уменьшается, принимая при  $K_{рез} > 1$  значения, меньшие температуры плавления  $\theta_{пл}$  обрабатываемого материала. Из этого вытекает, что определяющим параметром в зависимости  $\theta = \sigma \cdot z / c \cdot \rho$  является энергоемкость обработки  $\sigma$ , поскольку даже при  $z=1$  температура резания  $\theta$  за счет уменьшения  $\sigma$  может быть уменьшена до приемлемых значений. Следовательно, важнейшим условием уменьшения  $\theta$  необходимо рассматривать применение алмазных инструментов, обеспечивающих снижение энергоемкости обработки  $\sigma$  путем уменьшения условного угла сдвига материала  $\beta$  (вследствие снижения интенсивности трения образующейся стружки с передней поверхностью инструмента).

Глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали  $l_2$  (определяющая толщину нарушенного поверхностного слоя материала) выражается зависимостью [6]:  $l_2 = a \cdot z / \bar{l}_1$ . Расчетами установлено, что с увеличением скорости резания  $V$  параметр  $l_2$  уменьшается, а с уменьшением толщины среза  $a$ , наоборот, увеличивается (рис. 2). Поэтому с целью повышения качества обработки скорость резания  $V$  необходимо увеличивать, осуществляя режим высокоскоростного резания. Как отмечалось выше, это условие с наибольшей эффективностью может быть реализовано при резании алмазным инструментом.

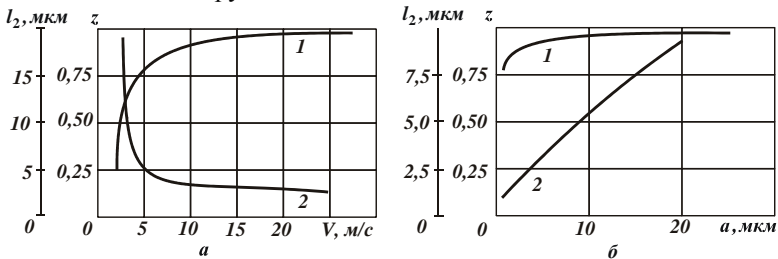


Рис. 2. Зависимости относительной величины температуры  $z$  (1) и параметра  $l_2$  (2) от скорости резания  $V$  (а) и толщины среза  $a$  (б) при резании закаленной стали ШХ15 (коэффициент температуропроводности  $-\lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\text{tg} \beta = 0,25$ ): а –

$$a = 5 \text{ мкм}; \text{ б} - V_{кр} = 27,5 \text{ м/с.}$$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что благодаря уникальным режущим свойствам алмазного резца, в процессе алмазного растачивания бронзовых втулок снижается силовая и тепловая напряженность процесса, а стойкость алмазного резца по отношению к твердосплавному резцу увеличивается более чем в 5 раз. Это стабильно обеспечивает погрешность формы обрабатываемой поверхности на уровне 1...2 мкм и шероховатость поверхности  $R_a = 1,25$  мкм. При этом исключается волнообразность на обрабатываемой поверхности, которая постоянно имела место в процессе рейберования, обеспечиваются допуски овальности и конусности, прямолинейности и размерности 9-ти отверстий (которые находятся в пределах 5 мкм). Применение алмазного растачивания позволяет исключить трудоемкую операцию рейберования. В результате предложенный технологический процесс обработки отверстий в бронзовых втулках включает лишь операции растачивания алмазным резцом и доводку пастой КТ.

Применение алмазных резцов взамен твердосплавных резцов при подрезке плоского торца бронзовой втулки также позволяет уменьшить погрешность формы обрабатываемой поверхности и обеспечить допуск плоскостности торца 5 мкм, шероховатость поверхности  $R_a = 0,4$  мкм. В результате снимаемый припуск может быть уменьшен в 3 раза. Это позволяет окончательную обработку производить алмазным резцом, а предварительную – твердосплавным резцом. Традиционно подрезка плоского торца бронзовой втулки осуществляется твердосплавными резцами на токарно-винторезном станке мод. ТВ-125П ( $n = 1000$  об/мин;  $S_{черн} = 0,1$  мм/об;  $S_{чист} = 0,05$  мм/об). При использовании алмазного резца обработку рекомендуется производить на современном токарном станке "Spinner" ТС-600.

Доводка торца в размер производится пастой КТ 3/2 (ТУ 2-037-273-88) путем притирки на стеклянной плите с последующей полировкой торца на бумаге (смоченной керосином) пастой КТ 1/0. Вследствие перехода к обработке отверстия и торца бронзовой втулки алмазным резцом появляется возможность уменьшить машинное время в 2 раза (до 0,8 часа), а повышение стабильности параметров точности и шероховатости поверхности позволяет повысить износостойкость деталей пар трения.

Полученные результаты были использованы для совершенствования операций обработки внутренних цилиндрических поверхностей деталей гидроаппаратуры, в частности, для обработки отверстия в магнитном кольце с наружным диаметром 20 мм и внутренним диаметром 6 мм, изготовленном из сплава АНКОЗА твердостью HRC 62-63. Данное кольцо является ответственной деталью насос-регулятора. Традиционно отверстие в кольце обрабатывается методом шлифования абразивным кругом ПП 10x20x3 25А 16СТ, который предварительно подвергается правке для получения наружного диаметра менее 6 мм. Процесс внутреннего шлифования протекает с высокой силовой и тепловой напряженностью, что приводит к интенсивному износу круга, быстрой потере его режущей способности и фактически к невозмож-

ности стабильно обеспечить требуемые параметры качества обработки. В связи с этим предложено перейти от шлифования к расточке отверстия твердосплавным резцом производства фирмы ISKAR. Проведенные исследования показали положительные результаты в плане повышения качества и производительности обработки. В процессе расточки стабильно обеспечивается шероховатость поверхности на уровне 7-го класса чистоты, что не достигалось при шлифовании. Поэтому предложено твердосплавные резцы фирмы ISKAR использовать при окончательной обработке со съемом припуска величиной 0,2 мм, а предварительную обработку выполнять с применением резцов из твердого сплава T15K6, обеспечивающих высокую размерную стойкость. При предварительной обработке обеспечивается изменение диаметра отверстия с 6 до 8,2 мм, а при окончательной обработке – до 8,5 мм.

**Выводы.** В работе теоретически и экспериментально обоснованы условия эффективного использования алмазных резцов взамен твердосплавных на операциях расточки отверстий деталей гидроаппаратуры. Показано, что эффект обработки, обусловленный снижением силовой и тепловой напряженности процесса резания, достигается благодаря снижению интенсивности трения сходящей стружки с передней поверхностью резца и соответственно увеличению условного угла сдвига материала  $\beta$  и уменьшению энергоемкости обработки  $\sigma$ . Расчетами установлено, что с увеличением коэффициента резания  $K_{рез}$  (равного отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания) энергоемкость обработки непрерывно уменьшается и при  $K_{рез} \rightarrow 10$  принимает значения, близкие к пределу прочности на сжатие обрабатываемого материала. Этим объясняются многочисленные экспериментальные данные (опубликованные в научно-технической литературе) об уменьшении сил и температуры резания при алмазной лезвийной обработке.

В работе экспериментально установлено, что применение алмазных резцов на операции расточки отверстий в бронзовых втулках обеспечивает высокие требования по точности и шероховатости обрабатываемой поверхности, чего ранее не достигалось при резании твердосплавными резцами. Это позволяет исключить трудоемкую промежуточную операцию рейберования, осуществляя сразу после операции алмазной расточки доводку пастой КТ с обеспечением требований по точности и шероховатости обработки. В работе также обоснована эффективность применения процесса растачивания отверстия диаметром 6 мм в магнитном кольце твердостью HRC 62-63 взамен процесса внутреннего шлифования.

**Список литературы:** 1. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. Т.3. Применение синтетических сверхтвердых материалов / Редкол.: Н.В. Новиков (отв. ред.) и др. – К.: Наук. думка, 1986. – 280 с. 2. Зубарь В.П., Тимчук А.Г., Чопенко М.В. Лезвийная обработка закаленных сталей и чугунов взамен шлифования // Сучасні технології в машинобудуванні. – 36. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ". – Вип. 5. – 2010. – С. 32-38. 3. Рябенков І.О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І.О. Рябен-

ков. – Одеса, 2009. – 21 с. 4. Новиков Ф.В., Рябенков И.А., Дерябин В.С., Машко А.А. Концепции развития механической обработки высокоточных изделий // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. – 2010. – Вип. 101. – С. 234-240. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 6. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов // Физические и компьютерные технологии. – Труды 13-й Международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8-20.

*Поступила в редколлегию 5.05.2011г.*

УДК 621.923

**Г.В. НОВИКОВ**, канд. техн. наук, Науч. центр НТК ”Эльбор”, Харьков.

## **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ В БРИЛЛИАНТЫ**

Узагальнено практичний досвід ефективного застосування електроерозійного виправлення алмазних кругів на металевій зв'язці при обробці природних алмазів у діаманти, наведені конкретні практичні рекомендації

Practical experience of effective application of electro-erosive correction of diamond circles is generalized on a metallic copula at treatment of natural diamonds in diamonds, concrete practical recommendations are resulted

Обобщен практический опыт эффективного применения электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке при обработке природных алмазов в бриллианты, приведены конкретные практические рекомендации

Ключевые слова: Шлифование, природный алмаз, алмазный круг, электроэрозионная правка, производительность обработки

**Введение и постановка задачи.** С организацией промышленного производства синтетических алмазов шлифование металлических и неметаллических труднообрабатываемых материалов (твердых сплавов, природных алмазов, изделий из стекла и хрусталя и т.д.) осуществляется фактически кругами из синтетических алмазов, которые в силу их высокой твердости и остроты режущих кромок обеспечивают обработку с низкой силовой и тепловой напряженностью процесса и высоким качеством обрабатываемых поверхностей [1, 2]. Вместе с тем, для эффективного применения алмазных кругов на высокопрочных металлических связках требуется их качественная подготовка к работе, включающая устранение биения, вскрытие алмазонасного слоя, поддержание высокой режущей способности круга в процессе