

Ф.В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, проф., ХНЭУ, г. Харьков;
И.А. РЯБЕНКОВ, канд. техн. наук,
В.С. ДЕРЯБИН, канд. техн. наук, ГП ХМЗ "ФЭД", г. Харьков

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗНОГО РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ГИДРОАППАРАТУРЫ

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 010С2Н3 твердостью HB ≥ 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. "Pisomax-60M" 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 BK8 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 производится доводка текстолитовым притиром пастой КТ. Данная технология характеризуется достаточной 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. "Pisomax-60M" ($n=8000$ 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 γ – передний угол инструмента; ψ – условный угол трения образующейся стружки с передней поверхностью инструмента ($tg \psi = f$). Это создает объективные предпосылки снижения силовой и тепловой напряженности процесса резания, т.к. энергоемкость обработки (условное напряжение резания) σ связана с углом β зависимостью [5]: $\sigma = \sigma_{сж} / tg \beta$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, МПа. Из зависимости следует, что чем больше угол β , тем меньше σ 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, м²; $K_{рез} = P_z / P_y = ctg(\psi - \gamma)$ – коэффициент резания. Между энергоемкостью обработки σ 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:

$$P_z = \frac{\sigma_{сж} \cdot S}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad P_y = \frac{\sigma_{сж} \cdot S}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right).$$
 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 $K_{рез}$. Расчетами установлено, что с увеличением $K_{рез} \rightarrow 10$ энергоёмкость обработки σ уменьшается фактически до значения $\sigma_{сж}$ (рис. 1,а). Увеличить $K_{рез} = P_z / P_y = ctg(\psi - \gamma)$ можно уменьшением разности углов $(\psi - \gamma)$, рис. 1,б.

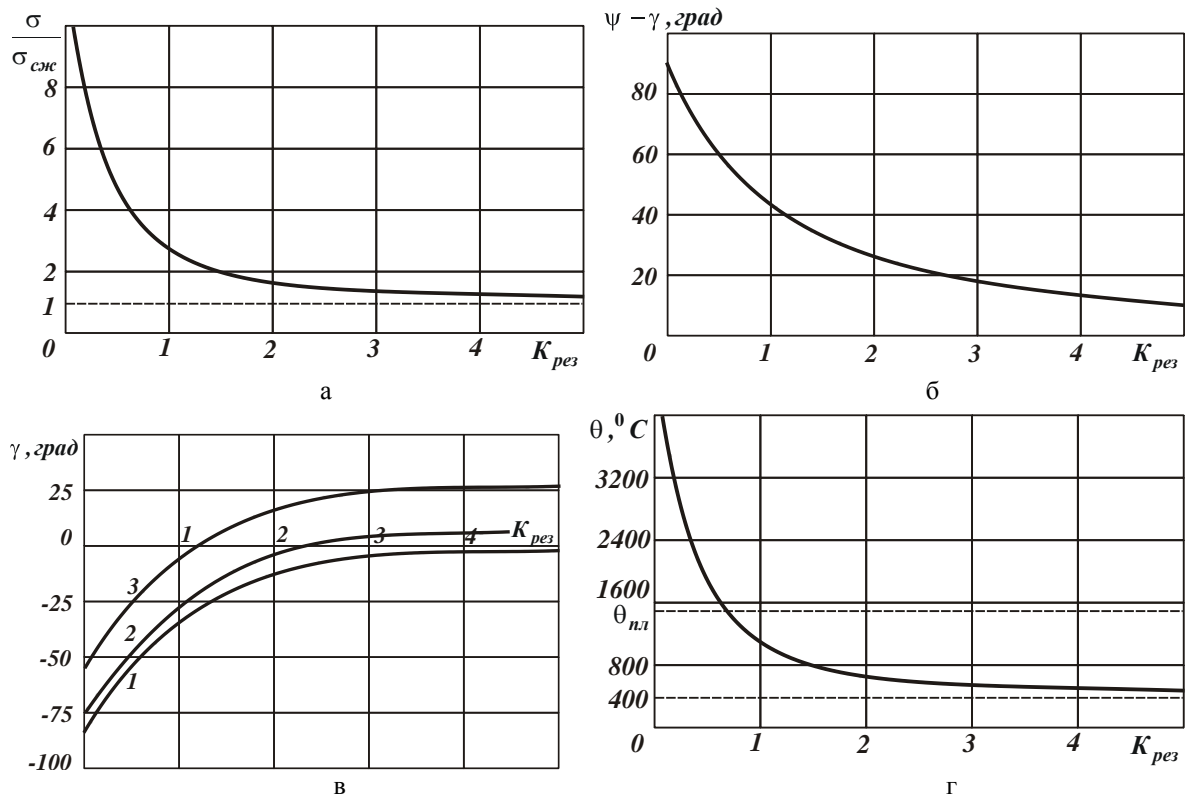


Рис. 1. Зависимости отношения $\sigma / \sigma_{сж}$ (а), угла $\psi - \gamma$ (б), переднего угла инструмента γ (в) и температуры резания θ (г) от коэффициента резания $K_{рез}$: 1 – $\psi = 10^\circ$ ($f = 0,176$); 2 – $\psi = 20^\circ$ ($f = 0,364$); 3 – $\psi = 40^\circ$ ($f = 0,839$); обрабатываемый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

Для алмаза коэффициент трения f может принимать значение 0,1. Тогда условный угол трения ψ образующей стружки с передней поверхностью инструмента (исходя из зависимости $tg\psi = f$) равен 6° , а коэффициент резания $K_{рез}$ (при $\gamma = 0$) – равен 10. Это указывает на то, что при резании алмазным инструментом может быть реализовано условие $\sigma \rightarrow \sigma_{сж}$, 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 σ при нулевом и даже отрицательном переднем угле инструмента γ (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 γ . Кроме того, уменьшение энергоёмкости обработки σ ведет к уменьшению температуры резания $\theta = \sigma \cdot z / c \cdot \rho$ [6], где c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; 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; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К).

Расчетами установлено, что с увеличением параметров a, V и β относительная величина температуры z увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $z \rightarrow 1$ (рис. 2). Следовательно,

чем меньше условный угол сдвига материала β , тем меньше относительная величина температуры z и соответственно температура резания θ . Из этого вытекает, что при резании алмазным инструментом, вследствие уменьшения условного угла сдвига материала β , появляется возможность уменьшения величины z и температуры резания θ . Это также позволяет увеличить скорость резания V и соответственно производительность обработки при заданном значении температуры резания θ . Таким образом показано, что уменьшение температуры резания θ происходит по двум каналам: путем уменьшения энергоемкости обработки σ и уменьшения относительной величины температуры z , хотя в обоих случаях первопричиной уменьшения θ является уменьшение условного угла сдвига материала β (определяющего параметры σ и z).

При существенном увеличении скорости резания V относительная величина температуры $z \rightarrow 1$. Тогда зависимость для определения температуры резания θ принимает упрощенный вид $\theta = \sigma / c \cdot \rho$. На рис. 1,г приведены рассчитанные по данной зависимости значения температуры резания θ с учетом значений σ , графически представленных на рис. 1,а. Как видно, с увеличением коэффициента резания $K_{рез}$ температура резания θ 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 σ , поскольку даже при $z=1$ температура резания θ за счет уменьшения σ может быть уменьшена до приемлемых значений. Следовательно, важнейшим условием уменьшения θ необходимо рассматривать применение алмазных инструментов, обеспечивающих снижение энергоемкости обработки σ путем уменьшения условного угла сдвига материала β (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.

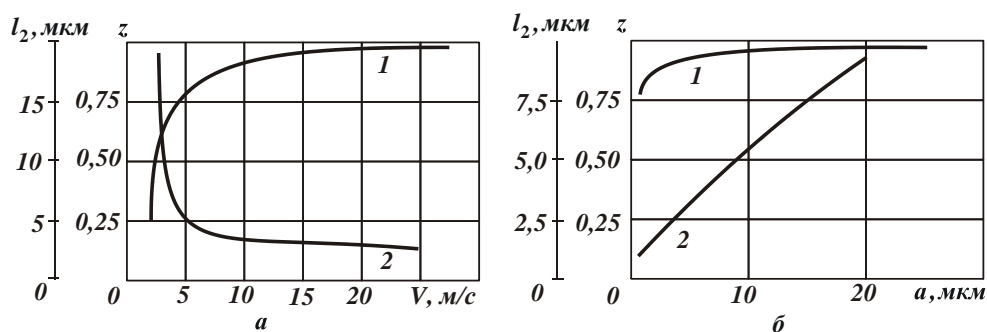


Рис. 2. Зависимости относительной величины температуры z (1) и параметра l_2 (2) от скорости резания V (а) и толщины среза a (б) при резании закаленной стали ШХ15 (коэффициент температуропроводности – $\lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\text{tg}\beta = 0,25$): а – $a = 5 \text{ мкм}$; 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 $R_a = 1,25 \text{ мкм}$. При этом исключается волнообразность на обрабатываемой поверхности, которая постоянно имела место в процессе рейберования, обеспечиваются допуски овальности и конусности, прямолинейности и разноразмерности 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; $S_{чери}=0,1$ мм/об; $S_{чист}=0,05$ мм/об). При использовании алмазного резца обработку рекомендуется производить на современном токарном станке "Spinner" TC-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 АНКО-3А 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 невозможности 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 Т15К6, 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 β и уменьшению энергоемкости обработки σ . 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. – Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХП", – 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. Рябенков. – Одеса, 2009. – 21 с. 4. Новиков Ф.В., Рябенков І.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.