

УДК 621.923

КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Рябенков И.А., канд. техн. наук,
Дерябин В.С., канд. техн. наук, Машко А.А.

*(Харьковский национальный экономический университет; ГП Харьковский
машиностроительный завод "ФЭД"; АО "АЛТА", г. Киев)*

Введение и постановка задачи. При изготовлении деталей гидроаппаратуры и других ответственных деталей постоянно возникают проблемы обеспечения точности и качества их механической обработки. В настоящее время накоплен достаточно большой опыт их решения [1–3]. Разработаны эффективные технологические процессы финишной обработки абразивными и лезвийными инструментами. Вместе с тем, все возрастающие требования к точности и качеству обработки деталей обуславливают необходимость проведения дальнейших исследований в данном направлении. Поэтому целью работы является обоснование условий повышения точности и качества обработки деталей.

Материалы и результаты исследований. В основу решений положены расчетные схемы микрорезания отдельным зерном (резцом) и процесса шлифования (рис. 1) [4, 5]. Общим в этих схемах является то, что снимаемый припуск условно представлен множеством бесконечно тонких адиабатических стержней, которые перерезаются со скоростью $V_{рез}$, определяющей скорость перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали. Адиабатический стержень разделен на два участка с длинами l_1 и l_2 . Длина l_1 соответствует перерезанной части стержня и определяет долю тепла, уходящего в образующиеся стружки. Длина l_2 равна глубине распространения тепла в поверхностный слой обрабатываемого материала вследствие его теплопроводности и определяет долю тепла, уходящего в обрабатываемую деталь. На основе учета баланса тепла, образующегося при резании, установлено, что наибольшая температура θ , достигаемая в точке А (рис. 1,а), и длина l_2 для процессов микрорезания отдельным зерном (резцом) и шлифования описываются одними и теми же аналитическими зависимостями, отличающимися лишь параметрами $V_{рез}$ и σ :

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot z, \quad (1)$$

$$l_2 = a \cdot \frac{z}{l_1}, \quad (2)$$

$$\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot a \cdot V_{рез} = -\ln(1-z) - z, \quad (3)$$

где σ – энергоемкость обработки (условное напряжение резания), Н/м²; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; z – относительная величина температуры, изменяется в пределах 0...1; \bar{l}_1 – безразмерная величина; a – толщина среза, м.

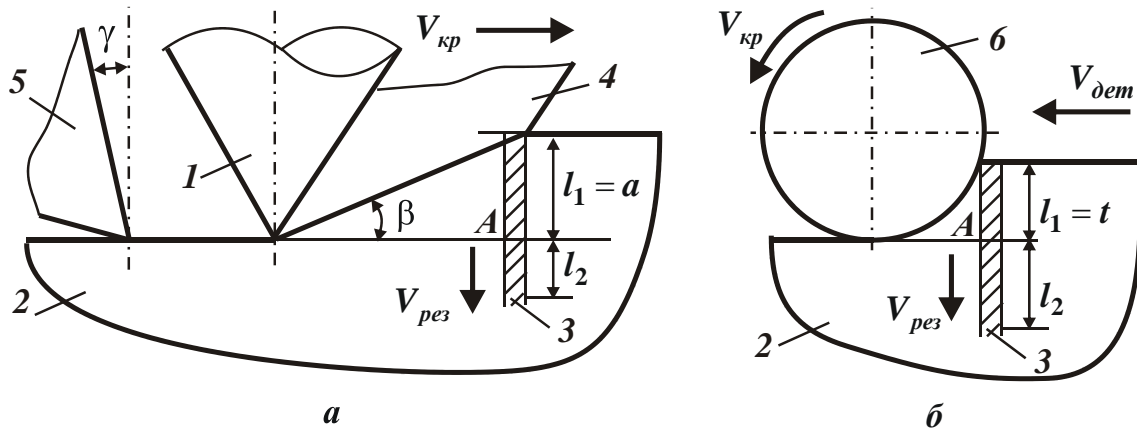


Рис. 1. Расчетные схемы микрорезания отдельным зерном (резцом) (а) и шлифования (б): 1 – режущее зерно; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень; 4 – стружка; 5 – резец; 6 – шлифовальный круг.

Тангенциальная составляющая силы резания P_z при механической обработке определяется зависимостью [6]:

$$P_z = \sigma \cdot S, \quad (4)$$

где S – площадь поперечного сечения среза, м².

Исходя из зависимостей (1) и (4), основными условиями уменьшения температуры θ и тангенциальной составляющей силы резания P_z является уменьшение энергоемкости обработки σ и площади поперечного сечения среза S , обусловленной параметрами режима резания. При точении $V_{рез} = V \cdot \operatorname{tg} \beta$;

$S = a \cdot b = \frac{Q}{V}$; $\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{Q}{b} \cdot \operatorname{tg} \beta = -\ln(1-z) - z$, где b – ширина среза, м; Q – производительность обработки, м³/с; V – скорость резания, м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала. Как следует из приведенных зависимостей, с увеличением производительности обработки Q величина z увеличивается, асимптотически приближаясь к единице (рис. 2). Это свидетельствует о том, что, начиная с определенного значения Q , величина z практически остается постоянной. Следовательно, появляется возможность обеспечения заданной температуры резания θ фактически при неограниченном увеличении производительности обработки. Однако для этого необходимо уменьшить σ до значения, при котором температура резания θ будет меньше

температуры плавления обрабатываемого материала, т.е. температуры, исключающей образование температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях. Таким путем при определенных значениях σ можно исключить температурный фактор из ограничений обработки, т.к. при этом температура резания θ будет заведомо меньше заданной. Как показано в нашей работе [6], выполнить данное условие можно за счет увеличения коэффициента резания $K_{рез} = P_z / P_y$, который входит в аналитическую зависимость для определения энергоемкости обработки (условного напряжения резания):

$$\sigma = \sigma_{сж} \cdot ctg\beta = \frac{\sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right), \quad (5)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н.

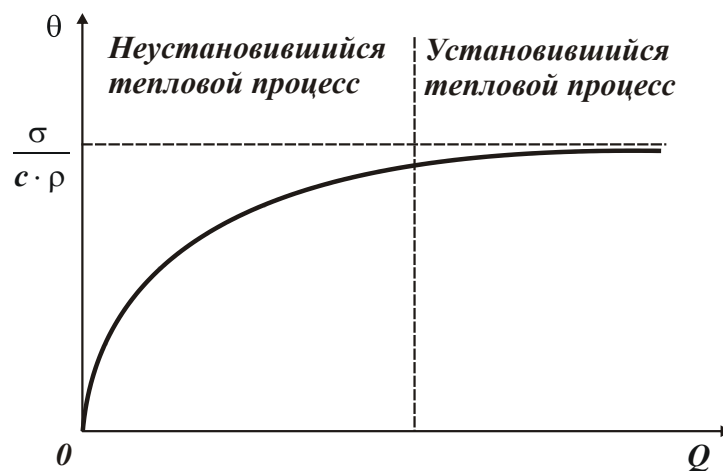


Рис. 2. Зависимость θ от Q .

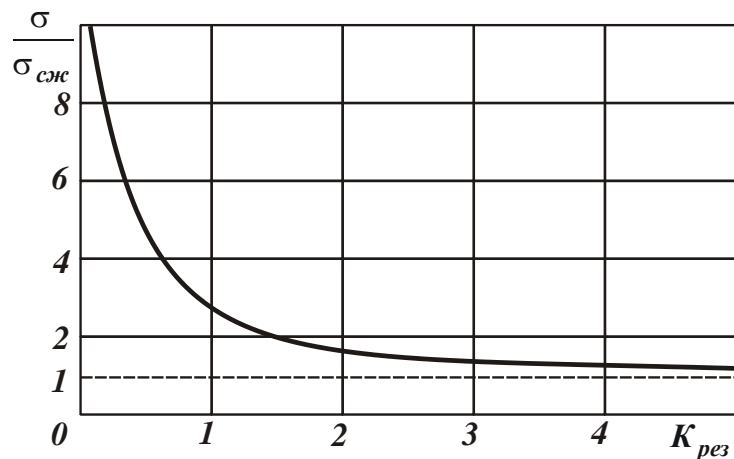


Рис. 3. Зависимость отношения $\sigma / \sigma_{сж}$ от коэффициента резания $K_{рез}$.

Исходя из графического представления зависимости (5), увеличение коэффициента резания $K_{рез}$ до значения $K_{рез} > 10$ приводит к существенному уменьшению $\sigma \rightarrow \sigma_{сж}$ (рис. 3). В этом случае энергоемкость обработки σ фактически не зависит от условий обработки, определяется лишь прочностью

обрабатываемого материала. К сожалению, реализовать условие $K_{рез} > 10$ на практике не удастся. Согласно зависимости $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$ [6], это связано со сложностью уменьшения угла $(\psi - \gamma) \rightarrow 0$, где γ – положительный передний угол инструмента; ψ – условный угол трения передней поверхности инструмента (резца) с образующейся стружкой. Причиной тому являются достаточно большие значения условного угла трения ψ передней поверхности резца с образующейся стружкой, превышающие значения переднего угла резца γ . Поэтому на практике реализуются значения $K_{рез} < 8$.

Основными тенденциями увеличения коэффициента резания $K_{рез}$ следует рассматривать уменьшение коэффициента трения обрабатываемого и инструментального материалов за счет увеличения скорости резания (переход в область высокоскоростного резания) и применения эффективных технологических сред. При шлифовании коэффициент резания $K_{рез}$ принимает относительно небольшие значения $K_{рез} < 1$. Следовательно, энергоемкость обработки σ при шлифовании значительно больше, чем при лезвийной обработке. Это предопределяет более высокие значения температуры θ и силы резания P_z при шлифовании, согласно зависимостям (1) и (4). Поэтому при шлифовании фактически не представляется возможным реализовать условие $z \rightarrow 1$ (рис. 2). Для обеспечения заданной температуры шлифования θ величина z должна быть небольшой ($z \ll 1$), а это предопределяет осуществление процесса обработки с относительно небольшой производительностью. В противном случае в связи с увеличением температуры шлифования θ на обрабатываемых поверхностях возможно появление температурных дефектов. Из этого следует, что с точки зрения снижения температуры θ и повышения производительности обработки применение лезвийных инструментов представляется более предпочтительным. Из этого также следует, что основным условием повышения эффективности шлифования в данном направлении необходимо рассматривать уменьшение σ за счет повышения режущей способности круга и, в первую очередь, за счет исключения трения связки круга с обрабатываемым материалом. В этом случае коэффициент резания $K_{рез}$ уменьшится до значения $K_{рез} = ctg(\psi + \gamma)$, где ψ – условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом; 2γ – отрицательный передний угол режущего зерна. Применяя, например, в качестве абразива алмазные зерна, можно значительно уменьшить условный угол трения $\psi < 10^0$. Тогда коэффициент резания $K_{рез}$ будет фактически определяться лишь углом γ , который может изменяться в пределах $-30^0 \dots -45^0$. В результате $K_{рез} \rightarrow 1$, что позволит уменьшить σ и соответственно повысить производительность обработки при обеспечении заданной температуры шлифования θ .

Данное условие практически реализуется при шлифовании с небольшой производительностью обработки, например, при окончательном шлифовании и

выхаживании. В этом случае в резании участвуют в основном зерна. Трение связки круга с обрабатываемым материалом незначительно и энергоемкость обработки σ принимает небольшие значения. Это является важным условием снижения силы резания P_z и обеспечения высоких показателей точности и шероховатости обрабатываемой поверхности, особенно в процессе выхаживания. Собственно этим и объясняется эффективность применения шлифования на финишных операциях. Однако эффект обработки достигается при небольших значениях σ , т.е. при шлифовании кругом, характеризующимся высокой режущей способностью. В противном случае обеспечить высокую точность обработки даже при выхаживании очень сложно. Так, установлено, что при использовании шлифовальных кругов с низкой режущей способностью, увеличение количества проходов при выхаживании фактически не ведет к уменьшению погрешностей обработки. В связи с этим, финишная обработка производится как абразивными, так и лезвийными инструментами, которые, как показано выше, позволяют уменьшить σ и тем самым обеспечить высокие показатели точности, шероховатости и качества обрабатываемых поверхностей. Наглядным тому примером является обработка алмазными лезвийными инструментами. Она характеризуется низкими коэффициентами трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента (соответственно небольшим условным углом трения ψ), что, согласно зависимости $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$, приводит к увеличению коэффициента резания $K_{рез}$ и уменьшению энергоемкости обработки σ . Благодаря этому применение алмазных резцов при точении в ряде случаев позволяет получить результаты по точности и шероховатости обработки гораздо лучшие, чем при шлифовании.

На основании сказанного можно заключить, что для эффективного применения процесса шлифования на финишных операциях обработки высокоточных деталей необходимо обеспечить существенное повышение режущей способности круга. Это достигается совершенствованием их структуры, материалов связки и т.д. с целью снижения интенсивности трения в зоне резания и соответственно энергоемкости обработки σ . Однако решить данную проблему в каждом конкретном случае достаточно сложно. Поэтому в настоящее время наблюдается тенденция применения взамен шлифования на финишных операциях лезвийной обработки, которая менее энергоемка и позволяет снизить силовую и тепловую напряженность процесса резания, повысить точность и качество обработки.

Эффективность механической обработки также зависит от уровня применяемого металлорежущего оборудования. Так, использование современных высокооборотных станков с ЧПУ позволяет прецизионную обработку сложных деталей гидроаппаратуры авиационной техники (изготовленных из высокопрочных сплавов и сталей) производить фактически с одного установа в автоматизированном режиме. Это обеспечивает более точное позиционирование обрабатываемой детали, резко снижает трудоемкость ее изготовления и повышает точность и качество обработки. Например, сложная в изготовлении деталь "водило" ранее обрабатывалась на универсальном

оборудовании с большим количеством токарных, фрезерных и сверлильных операций. В настоящее время эти операции объединены в одну операцию, которая выполняется на современном обрабатывающем центре “Pisomax 60”. Если ранее для обработки данной детали использовалось 47 различных видов режущих инструментов, то по новой технологии – 23 инструмента. Таким образом, достигнута экономия по расходу режущих инструментов. При этом стабильно обеспечивается шероховатость поверхности на уровне $R_a=0,63$ мкм, погрешность обработки отверстий – 0,01 мм, межцентровые расстояния выполняются с допусками на размеры $\pm 0,01$ мм. Производительность труда повысилась в 2,5 раза, что позволило сократить число работающих с 8 до 2-х человек.

Ранее измерения параметров обрабатываемых поверхностей производились индивидуальными мерителями (пробками, калибрами, с помощью микроскопа и т.д.), а в настоящее время – с помощью контрольно-измерительной машины “Wenzel”. Это позволило гарантировать размеры взаимного положения обрабатываемых отверстий и фрезерованных поверхностей. Также удалось уйти от координатной расточки и шлифования.

При изготовлении ступенчатых отверстий эффективно предварительную обработку выполнять специально изготовленными ступенчатыми зенкерами. Так, установлено, что применение ступенчатого зенкера диаметрами 6,5 и 10 мм, изготовленного из быстрорежущей стали P18, на современном станке “Hermle” (подача – 10 мм/мин, скорость резания – 1000 об/мин) обеспечивает 6-й класс точности обработки. Последующие операции растачивания и развертывания позволяют повысить точность обработки до 9-го класса.

Были проведены экспериментальные исследования процесса фрезерования твердосплавными концевыми фрезами отверстий в деталях из закаленных сталей твердостью HRC 51...56 на станке с ЧПУ модели “Pisomax 60”, и показана возможность повышения точности, качества и производительности обработки за счет перехода в область высокоскоростного фрезерования. Это, по сути, является новым направлением механообработки и позволяет с высокой эффективностью заменить традиционно применяемую технологию обработки глухих отверстий в агрегате “блок цилиндров”, включающую растачивание с последующим хонингованием и не обеспечивающую стабильно отклонение от цилиндричности в пределах 0,01 мм. Экспериментально установлено, что при высокоскоростном фрезеровании данных отверстий ($n=8000$ об/мин) стабильно обеспечивается отклонение от цилиндричности 0,01 мм и шероховатость поверхности на уровне $R_a=0,63$ мкм (рис. 4). При этом до 2,5 раз увеличивается производительность обработки и до 4 раз стойкость твердосплавных концевых фрез, исключаются прижоги и другие температурные дефекты. Установлено, что с увеличением частоты вращения фрезы в пределах 1000...8000 об/мин микротвердость H_{100} обработанного отверстия уменьшается от 2300 до 1900 МПа. Это незначительно отличается от исходной микротвердости 2450 МПа, что свидетельствует о преобладании в механизме формирования параметров

качества обработки силового фактора и незначительной роли теплового фактора. На основе полученных результатов разработана эффективная технология высокоскоростного фрезерования глухих отверстий и дуговых пазов шириной 2,5...5,0 мм в деталях из закаленных сталей твердостью HRC 51...56, применение которой позволило решить сложные задачи по повышению качества и производительности обработки.

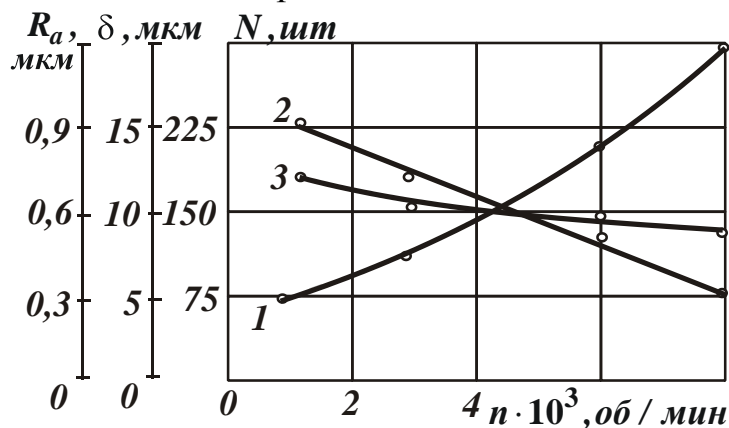


Рис. 4. Влияние частоты вращения фрезы n на количество обработанных одной фрезой отверстий N (1), отклонение от цилиндричности отверстия δ (2), параметр шероховатости обработки R_a (3): глубина резания $t=0,15$ мм; круговая подача $S=0,25$ мм/об; вертикальная подача – 125 мм/мин.

Выводы. В работе обоснованы научные концепции повышения качества и точности обработки с учетом температурного и силового факторов при резании лезвийными и абразивными инструментами. Приведены конкретные примеры обработки высокоточных деталей гидроаппаратуры с применением современного металлорежущего оборудования и прогрессивных кинематических схем резания. Полученные результаты исследований могут быть использованы при механической обработке различных деталей, к которым предъявляются повышенные требования по качеству и точности изготовления.

Список литературы

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Лурье Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с.
3. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
4. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф.В. Новиков, С.М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: междун. научн.-техн. конф., 19-20 апреля 2007 г.: труды – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 8-20.
5. 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.

6. 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.