

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Приведены особенности обработки отверстий комбинированным осевым инструментом. Предложен алгоритм выбора структуры комбинированного осевого инструмента для реализации технологического процесса обработки совокупности отверстий, основанный на анализе их конструктивно-технологических характеристик и увеличении концентрации технологических переходов. Предложена математическая модель, позволяющая описать структуру комбинированного осевого инструмента и принцип работы его ступеней.

Ключевые слова: обработка отверстий, комбинированный осевой инструмент, технологический процесс, концентрация операций

Введение. Маршрут обработки отверстия, применение определенных операций обработки и их последовательность зависят от геометрических параметров (диаметра, длины, формы) отверстия, а также предъявляемых технических требований: точности и шероховатости поверхности. По данным [1] для получения отверстия диаметром более 30 мм в сплошном металле выполняют как минимум за два перехода, сначала сверлят отверстие сверлом меньшего диаметра, затем – требуемого диаметра. В некоторых работах предлагают рассверливать отверстия уже с диаметра 18 мм. При составлении маршрута обработки следует учитывать рекомендации по области применения той или иной технологической операции.

Концентрацию технологических операций можно осуществить, применяя комбинированный осевой инструмент (КОИ), например, при последовательной обработке одного сквозного отверстия или параллельной обработке ступенчатых соосных поверхностей [2, 3, 4]. Наибольшее развитие применения КОИ получило в 70-80-е гг. XX ст. в массовом производстве для повышения производительности при работе на агрегатных станках и автоматических линиях. Причем, считается, что с уменьшением серийности производства экономическая эффективность применения КОИ уменьшается.

Анализ последних исследований и литературы. На область применения методов обработки, осуществляемых КОИ, могут влиять: форма и размеры отверстия, параметры точности, шероховатости и поверхностного слоя, материал обрабатываемой детали.

При составлении конкурирующих вариантов схем обработки отверстий с применением КОИ, на практике множество возможных вариантов объединения элементарных режущих инструментов в единый КОИ ограничено. Так, не следует применять КОИ с числом ступеней более пяти или шести. Нежелательно сочетание ступеней инструментов, при которых неизбежно неравномерное изнашивание режущих кромок из-за различия в подачах и скоростях резания. Ограничивают объединение в одном инструменте предварительной и

окончательной обработки, т.к. возникающие при этом вибрации могут привести к потере точности. Автор работы [1] считает, что соотношение диаметров двух соседних ступеней не должно превышать 1,5–2 раза; значения максимальной и минимальной точности поверхностей, обрабатываемых данным КОИ, не должна отличаться более, чем на два качества; подача КОИ, ступени которого работают по параллельной схеме резания, не должна быть меньше минимально допустимой для элементарных режущих инструментов, формирующих его. В случае последовательной или последовательно-параллельной работы ступеней КОИ необходимо обеспечить условие «открытости» поверхностей, т.е. необходимо предусмотреть наличие пространства для выхода инструмента из обработанного отверстия.

Исследования [5] показали, что при последовательной или последовательно-параллельной работе КОИ типа «ступенчатое сверло» с точки зрения уменьшения силовых нагрузок (осевой силы и крутящего момента) на технологическую систему целесообразно ограничиться тремя ступенями. Т.к. в этом случае суммарная сила резания меньше, даже чем при обработке стандартным осевым инструментом, за счет постепенного распределения припуска.

Постановка проблемы. Ни один из вариантов технологического процесса (ТП), в состав которого входят операции обработки отверстий с применением осевого инструмента не может быть абсолютно эффективным, так как всегда имеется возможность его улучшения. Одной из таких возможностей является применение КОИ.

Однако, производственный опыт применения КОИ и наши исследования показывают, что не всегда экономически целесообразно изготавливать КОИ только лишь для одного конкретного отверстия: цилиндрического гладкого или ступенчатого. В условиях многономенклатурного производства есть смысл сформировать комплексный ТП, для всей совокупности отверстий (рис. 1). Исходные данные при формировании

такого ТП и структуры КОИ для его осуществления получают в результате соответствующего анализа конструктивно-технологических параметров всей совокупности отверстий, подлежащей обработке. Иными словами, следует предусмотреть разработку ТП для групп деталей, имеющих сходство конструктивных форм и размеров отверстий, используемых материалов.



Рис. 1 – Некоторые начальные условия для разработки вариантов структуры технологического процесса обработки отверстий с применением КОИ

Для этого необходимо провести поиск наилучшего технологического решения получения каждого отверстия. Это решение должно обеспечивать заданные размеры (диаметр и длину) и качественные параметры (точность размеров и шероховатость поверхности) отверстия. Для этого при анализе следует учитывать форму: цилиндрическое, коническое, фасонное, сквозное, глухое, ступенчатое отверстие и т.д. Важное значение имеют длины отверстий с одинаковыми диаметрами, исходя из которых выбираются длины ступеней КОИ.

Кроме того, при выборе технологического решения при разработке ТП получения отверстия с заданными конструктивно-технологическими характеристиками необходимо знать области применения каждой ступени КОИ и факторы, ограничивающие эту область.

Алгоритм принятия решения следующий:

- 1) выбор метода (операции) с помощью которой можно получить отверстие, заданной формы;
- 2) выбор метода (операции), обеспечивающего получения заданного диаметра, а затем и длины отверстия;
- 3) выбор метода (операции), обеспечивающего достижения заданной точности и шероховатости поверхности.

Целью данной статьи является обоснование, выбор и математическое описание рациональной структуры ТП обработки отверстий, осуществляемого КОИ.

Основная часть. Расширение функциональных возможностей КОИ можно достичь путем его использования для группы изделий с общими конструктивными признаками, например, с большим количеством разнообразных отверстий. Это позволит увеличить максимальное число выполняемых операций обработки отверстий одним инструментом с минимальным количеством переналадок.

Кроме того, несмотря на все наложенные ограничения, один и тот же КОИ может применяться для обработки большого количества различных вариантов отверстий (рис. 2), что значительно расширяет его технологические возможности. В этом случае с целью автоматизации выбора структуры ТП обработки отверстий с помощью КОИ целесообразно сформировать математическую модель его работы.

Обычно технологический маршрут обработки детали имеет вид построчной записи, отображающей последовательность выполняемых операций и переходов (рис. 3) с указанием различных параметров, в том числе размеров обрабатываемых поверхностей и инструмента, необходимого для выполнения того или иного перехода

№ ступени	Схема обрабатываемого отверстия	Характеристика обрабатываемого отверстия	№ ступени	Схема обрабатываемого отверстия	Характеристика обрабатываемого отверстия
1		Обработка сквозного отверстия диаметром $D=d_1$ и длиной L_0 , изменяющейся в пределах $0 < L_0 < L_1$	1 и 2 или 2 и 3		Обработка сквозного двухступенчатого отверстия диаметрами ступеней $D_1=d_1$, $D_2=d_2$ и длинами изменяющимися в пределах $0 < L_{01} < L_1$, $0 < L_{02} < L_2$ или $D_2=d_2$, $D_1=d_1$ и длинами изменяющимися в пределах $0 < L_{01} < L_2$, $0 < L_{02} < L_3$
1		Обработка глухого отверстия диаметром $D=d_1$ и длиной L_0 , изменяющейся в пределах $0 < L_0 < L_1$	1 и 2		Обработка глухого двухступенчатого отверстия диаметрами ступеней $D_1=d_1$, $D_2=d_2$ и длинами изменяющимися в пределах $L_{01}=L_1$, $0 < L_{02} < L_2$
2 или 1 и 2		Обработка сквозного отверстия диаметром $D=d_2$ и длиной L_0 , изменяющейся в пределах $0 < L_0 < L_2$	1 и 2 и 3		Обработка сквозного трехступенчатого отверстия диаметрами ступеней $D_1=d_1$, $D_2=d_2$, $D_3=d_3$ и длинами изменяющимися в пределах $0 < L_{01} < L_1$, $L_{02}=L_2$, $0 < L_{03} < L_3$
3 или 2 и 3 или 1 и 2 и 3		Обработка сквозного отверстия диаметром $D=d_3$ и длиной L_0 , изменяющейся в пределах $0 < L_0 < L_3$	1 и 2 и 3		Обработка глухого трехступенчатого отверстия диаметрами ступеней $D_1=d_1$, $D_2=d_2$, $D_3=d_3$ и длинами изменяющимися в пределах $L_{01}=L_1$, $L_{02}=L_2$, $0 < L_{03} < L_3$

Рис. 2 – Варианты отверстий, которые можно обработать трехступенчатым КОИ

035 Сверлильная

1. Сверлить отверстие диаметром D_1 на длину L_1 ;
2. Сверлить отверстие диаметром D_2 на длину L_1 ;
3. Сверлить отверстие диаметром D_3 на длину L_2 ;
4. Сверлить 2 отверстия диаметром D_4 на длину L_2 ;
5. Зенкеровать два отверстия диаметром D_5 и D_6 на длину L_1 одновременно;
6. Зенкеровать отверстие диаметром D_7 на длину L_2 ;
7. Развернуть отверстие диаметром D_8 на длину L_2 ;
8. Зенковать фаску $C_1 \times 45^\circ$ на диаметре D_5 ;
9. Зенковать 2 фаски $C_2 \times 45^\circ$ на диаметре D_4 ;

Рис. 3 – Фрагмент маршрута обработки отверстий в детали

Технологический маршрут обработки может быть представлен в виде блок-схемы, состоящей из блоков, отображающих содержание технологической операции, и расположенных в порядке их выполнения (рис. 4).

Операция 035 Сверлильная

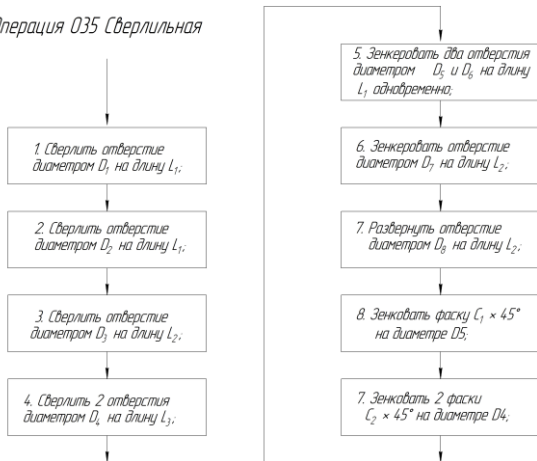


Рис. 4 – Блок-схема фрагмента маршрута обработки отверстий в детали «Корпус»

Такое представление ТП целесообразно при обработке стандартными инструментами, но не отображает порядок получения отверстия при обработке с помощью КОИ, ступени которого, в зависимости вида концентрации операций могут работать последовательно, параллельно или последовательно-параллельно. Поэтому для наглядности при формировании блок-схемы маршрута обработки с применением КОИ целесообразно отображать работу каждой его ступени в зависимости от вида концентрации операций, которую они осуществляют (рис. 5).

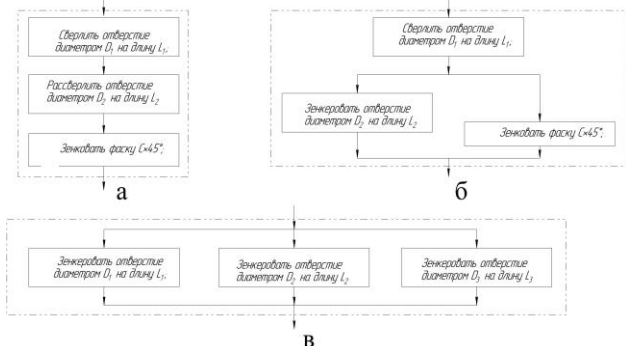


Рис. 5 – Блок-схема последовательности выполнения операций КОИ в зависимости от принципа работы ступеней: а – последовательно; б – последовательно-параллельно; в – параллельно

Тогда блок-схема фрагмента маршрута обработки отверстий с применением КОИ принимает другой

вид (рис. 6). Блоки, объединенные штрихпунктирной линией, указывают на применение КОИ с последовательной (сверло-зенкер-развертка), параллельной (двухступенчатый зенкер) или последовательно-параллельной (двухступенчатое сверло, сверло-зенковка) схемой резания. Остальные переходы выполняются стандартными осевыми инструментами (зенковка) или, если есть такая возможность, отдельными ступенями КОИ, указанными выше.

Операция 035 Сверлильная

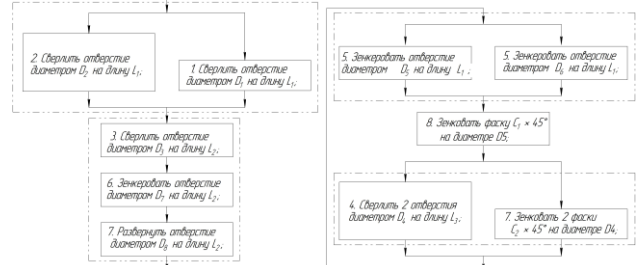


Рис. 6 – Блок-схема фрагмента маршрута обработки отверстий с применением КОИ

Кроме того, формально любой n -ступенчатый КОИ, состоящий из элементарных осевых инструментов, можно представить:

$$Q = A_i \wedge A_j \wedge A_k \wedge \dots \wedge A_n, \quad (1)$$

где A_i, A_j, A_k, A_n – символьное обозначение 1-й, 2-й, 3-й, n -ой ступени инструмента в общем виде; i, j, k, n – индексы, диаметрального размера в порядке возрастания, $i < j < k < n$.

В общем случае КОИ может состоять из ступеней, выполняющих различное технологическое назначение (сверление, зенкерование, зенкование, цекование, развертывание) и расположенных в практически произвольном порядке в зависимости от технического задания. Порядок компоновки стандартных инструментов ограничивается следующими условиями: диаметры ступеней КОИ должны возрастать в сторону хвостовика; следует выполнять сначала черновые затем чистовые переходы. Учитывая вышеизложенное:

$$Q = \begin{cases} A_i = C_i \vee 3e_i \vee Ce_i \vee 3_i \vee P_i \\ A_j = C_j \vee 3e_j \vee Ce_j \vee 3_j \vee P_j \\ A_k = C_k \vee 3e_k \vee Ce_k \vee 3_k \vee P_k, \\ \dots \\ A_n = C_n \vee 3e_n \vee Ce_n \vee 3_n \vee P_n \end{cases} \quad (2)$$

где C_i, C_j, C_k, C_n – ступень, выполненная сверлом, диаметром i, j, k, n ; $3e_i, 3e_j, 3e_k, 3e_n$ – ступень, выполненная зенковкой, диаметром i, j, k, n ; Ce_i, Ce_j, Ce_k, Ce_n – ступень, выполненная цековкой, диаметром i, j, k, n ; $3_i, 3_j, 3_k, 3_n$ – ступень, выполненная зенкером, диаметром i, j, k, n ; P_i, P_j, P_k, P_n – ступень, выполненная разверткой, диаметром i, j, k, n .

Т.к. ступени одного и того же КОИ могут работать по последовательной, параллельной или последовательно-параллельной схеме, то математическое

описание ТП в зависимости от принципа работы ступеней (1) и (2) можно развернуть.

Так, при описании последовательной работы ступеней n -ступенчатого КОИ запись (1) принимает вид

$$Q = (A_i \wedge \overline{A_j} \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge \overline{A_n}) \wedge (\overline{A_i} \wedge A_j \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge \overline{A_n}) \wedge \dots \\ \dots \wedge (\overline{A_i} \wedge \overline{A_j} \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge A_n) \\ \text{при} \begin{cases} A_i = C_i \vee 3e_i \vee Ce_i \vee 3i \vee P_i \\ A_j = C_j \vee 3e_j \vee Ce_j \vee 3j \vee P_j \\ A_k = C_k \vee 3e_k \vee Ce_k \vee 3k \vee P_k \\ \dots \\ A_n = C_n \vee 3e_n \vee Ce_n \vee 3n \vee P_n \end{cases}$$

Например, сверло-зенкер-развертка (см. рис. 6) с последовательной схемой резания:

$$Q'' = (C_3 \wedge \overline{3_7} \wedge \overline{P_8}) \wedge (\overline{C_3} \wedge 3_7 \wedge \overline{P_8}) \wedge (\overline{C_3} \wedge \overline{3_7} \wedge P_8),$$

где C_3 – ступень, выполненная в виде сверла, с диаметрами D_3 ; 3_7 – ступень, выполненная в виде зенкера, с диаметром D_7 ; P_8 – ступень, выполненная в виде развертки, с диаметром D_8 , при $D_3 < D_7 < D_8$.

При параллельной работе ступеней КОИ запись (1) принимает вид:

$$Q = (A_i \wedge \overline{A_j} \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge \overline{A_n}) \vee (\overline{A_i} \wedge A_j \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge \overline{A_n}) \vee \dots \\ \dots \vee (\overline{A_i} \wedge \overline{A_j} \wedge \overline{A_k} \wedge \dots \wedge A_n) = A_i \vee A_j \vee A_k \vee \dots \vee A_n \\ \text{при} \begin{cases} A_i = C_i \vee 3e_i \vee Ce_i \vee 3i \vee P_i \\ A_j = C_j \vee 3e_j \vee Ce_j \vee 3j \vee P_j \\ A_k = C_k \vee 3e_k \vee Ce_k \vee 3k \vee P_k \\ \dots \\ A_n = C_n \vee 3e_n \vee Ce_n \vee 3n \vee P_n \end{cases}$$

Например, двуступенчатый зенкер (см. рис. 6) с параллельной схемой резания:

$$Q''' = 3_5 \vee 3_6,$$

где $3_5, 3_6$ – ступени, выполненные в виде зенкера, с диаметрами D_5, D_6 соответственно, при $D_5 < D_6$.

Кроме того, зачастую ступени КОИ работают по последовательно-параллельной схеме резания, когда количество одновременно работающих ступеней инструмента меняется с течением времени и может составлять одну, две или более ступеней, что регламентируется длинами обрабатываемых отверстий и ступеней самого инструмента. Поэтому запись КОИ, работающего по последовательно-параллельной схеме резания имеет вид совокупности записей (1–4). Причем, ступень, которая не участвует в обработке записывается с чертой над ее обозначающим символом, например $\overline{3_3}$.

Так, двухступенчатое сверло (см. рис. 6) с последовательно-параллельной схемой резания

$$Q^I = (C_2 \vee \overline{C_1}) \wedge (C_2 \vee C_1),$$

где C_1, C_2 – ступени, выполненные в виде сверл, с диаметрами D_1, D_2 соответственно, при $D_2 < D_1$.

Сверло-зенковка (см. рис. 6) с последовательно-параллельной схемой резания:

$$Q^{IV} = (C_4 \vee \overline{3e_4}) \wedge (C_4 \vee 3e_4),$$

где C_4 – ступень, выполненная в виде сверла, с диаметрами D_4 ; $3e_4$ – ступень, выполненная в виде зенковки для обработки фаски на диаметре D_4 .

Таким же образом можно описать ТП обработки отверстий, осуществляемый с помощью КОИ, более сложной структуры. Теоретически существует «идеальный» КОИ, с помощью которого можно выполнить обработку всей совокупности отверстий детали, узла, сборочной единицы. Структуру этого КОИ также можно описать данным способом.

Выводы. Сформулирован новый подход формирования ТП обработки отверстий и структуры КОИ для его осуществления, который предусматривает анализ всей совокупности отверстий и выбор рационального маршрута обработки с целью увеличения концентрации технологических переходов. На базе предложенной математической модели описания структуры КОИ и принципа работы его ступеней, созданы предпосылки для автоматизированной компоновки КОИ, в зависимости от технического задания.

Список литературы: 1. Яковенко И.Э. Оптимизация структуры и параметров инструментальных наладок при проектировании технологических компоновок агрегатных станков малого и среднего размеров: дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Яковенко Игорь Эдуардович. – Харьков, 1992 – 282 с. 2. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов: учебн. пособие для вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» / Г.Г. Иноземцев. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с. 3. Кожевников Д.В. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Кожевников Д.В, Гречишников В.А., Кирсанов С.В. и др. Под ред. С.В. Кирсанова. – 2-е изд. доп. М.: Машиностроение, 2005. – 528 с. 4. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. / Родин П.Р. – К.: «Вища школа», 1974. –399 с. 5. Степанов М.С. Дослідження силових характеристик при послідовно-паралельній обробці отворів комбінованим осьовим інструментом [Текст] / М.С. Степанов, М.С. Іванова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – No 42 (1085). – С. 19–25.

Bibliography (transliterated): 1. Yakovenko I.E. *Optimizatsiya struktury i parametrov instrumentalnykh naladok pri proektirovanii tehnologicheskikh komponovok agregatnykh stankov malogo i srednego razmerov: dis. kand. tehn. nauk : 05.02.08 / Yakovenko Igor Eduardovich.* – KHarkov, 1992 – 282. 2. Inozemcev G.G. *Proektirovanie metallorazhushhih instrumentov: uchebn. posobie dlya vtuzov po special'nosti «Tehnologija mashinostroenija, metallorazhushhie stanki i instrumenty» / G.G. Inozemcev.* – Moscow: Mashinostroenie, 1984. – 272 p. 3. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.A., Kirsanov S.V. *Rezhushhij instrument: Uchebnik dlja vtuzov – 2-e izd. dop.* Moscow: Mashinostroenie, 2005. – 528 p. 4. Rodin P.R. *Metallorazhushhie instrumenty.* – Kyiv: «Vishha shkola», 1974. –399 p. 5. Stepanov M.S., Ivanova M.S. *Doslidzhennja silovih charakteristik pri poslidojno-paralel'nij obrobci otvoriv kombinovanim os'ovim instrumentom.* Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «KhPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: Tehnologii v mashinobuduvanni. – Kharkov. : NTU «KhPI». 2014. – Vol 42 (1085). – P. 19–25.

Поступила (received) 20.03.2015

Иванова Марина Сергеевна – ассистент НТУ «ХПИ», тел.: (057)-707-66-25, e-mail: ivanova_maryna@i.ua.