

DOI: 10.53078/20778481_2023_2_34

УДК 621.95.01

О. Н. Кляус, А. А. Жолобов

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

O. N. Kliaus, A. A. Zholobov

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF FORMING HOLES WITH A BLADE TOOL

Аннотация

Целью представленной статьи является изложение методики определения оптимального варианта формирования отверстий в сплошном материале лезвийным инструментом по комплексному критерию минимизации основного времени T_o + работа A , затрачиваемые на технологический процесс механической обработки этих отверстий, в том числе и относительно длинных ($4 < l/d < 10$), а также разработка на основе этой методики и анализа результатов, теоретических основ структурной оптимизации способов формирования как гладких относительно длинных, так и ступенчатых отверстий.

Ключевые слова:

структурная оптимизация; относительно длинное отверстие, ступенчатое отверстие, лезвийный режущий инструмент, основное время, работа, затраченная на обработку.

Для цитирования:

Кляус, О. Н. Структурная оптимизация процесса формирования отверстий лезвийным инструментом / О. Н. Кляус, А. А. Жолобов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 34–43.

Abstract

The purpose of this article is to present a methodology for determining the optimal variant of forming holes in a solid material with a blade tool according to the complex criterion of minimizing the main time T_o + work A spent on the technological process of machining these holes, including relatively long ones ($4 < l/d < 10$), as well as, based on this technique and the analysis of the results, to develop the theoretical foundations of structural optimization of methods for forming both smooth, relatively long holes and stepped ones.

Keywords:

structural optimization, relatively long hole, stepped hole, blade cutting tool, main time, work performed.

For citation:

Kliaus, O. N. Structural optimization of the process of forming holes with a blade tool / O. N. Kliaus, A. A. Zholobov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 2 (79). – P. 34–43.

Введение

Одним из важнейших направлений в повышении эффективности того или иного процесса механической обработки деталей машин является оптимизация всех или основных операций формирования поверхностей изделий. При обработке отверстий в деталях к таким

процессам относятся сверление, рас-сверливание, зенкерование, развертывание, протягивание, растачивание и рас-фрезеровывание. В качестве критерия оптимизации, наиболее распространенного при выполнении большинства исследований в этом направлении, является минимизация основного времени [1–12]. В настоящей работе в каче-

стве критериев оптимизации, наряду с основным временем, принята работа, затрачиваемая на выполнение того или иного перехода (операции) механической обработки поверхностей. Одновременно предпринята попытка применения комплексного показателя оптимизации основное время T_0 + работа A , затрачиваемые на обработку поверхностей.

Таким образом, целью первого этапа этой работы являлось определение оптимального варианта формирования отверстия не ниже восьмого качества точности с шероховатостью поверхностей 1,25...2,5 мкм по Ra на основе анализа способов его обработки по комплексному критерию.

В качестве принятых способов обработки мерным инструментом анализ проводился по четырем вариантам, приведенным на рис. 1, что дает возможность в направлении исследований включить и формирование относительно длинных отверстий ($4 < l/d < 10$) при рекомендуемом для сверления в сплошном металле $d_{св.мах} = 25$ мм, а $l_{отв}$ будет находиться в пределах 100...250 мм.

Целесообразность применения первого и второго вариантов (см. рис. 1) подтверждается наличием инструмента с параметрами, соответствующими вышеуказанному соотношению для относительно длинных отверстий [13–15].

В третьем и четвертом способах обработки отверстий отсутствует развертывание, присутствующее в первом и втором, в связи с тем, что при использовании ступенчатого зенкера обеспечивается требуемая точность при сокращении количества инструментов в наладке и технологических переходов при обработке.

Такой способ обработки отверстий, как протягивание, в настоящей работе не рассматривается в связи с тем, что, во-первых, необходимо специальное оборудование, которое требует дополнительных мощностей и площадей, во-вторых, высокая стоимость и слож-

ность инструмента, в-третьих, этот процесс нельзя использовать для формирования относительно длинных отверстий.

При растачивании таких отверстий основными недостатками являются копирование дефектов оси отверстия, полученных на предшествующей обработке в связи с существенной деформацией расточной оправки, т. к. стандартный расточной резец не обеспечивает обработку длин $4 < l/d < 10$, а использование расточной оправки существенно усложняет весь процесс.

Расфрезеровывание указанного выше отверстия при условии создания специальной оправки будет занимать значительное время как при винтовой, так и при круговой интерполяции и совершенно не гарантирует исправление дефектов оси.

Таким образом, принятые варианты обработки относительно длинных отверстий (см. рис. 1) являются наиболее приемлемыми. В связи с тем, что вариантов технологических процессов несколько, необходимо определить, какой из них будет наиболее эффективным по указанным ранее критериям.

Поэтому целью следующего этапа исследований являлось определение эффективного способа формирования относительно длинного отверстия порядка восьмого качества точности с шероховатостью поверхностей 1,25...2,5 мкм по Ra для принятого ниже примера путем анализа вариантов его обработки.

Анализ эффективности формирования относительно длинных отверстий

Исходя из условий определения относительно длинного отверстия, предложенных в предыдущей части статьи, следует подобрать соответствующие параметры отверстия с учетом технологических возможностей современных инструментов, регламентированных стандартом и каталогами. Поскольку первой операцией для формирования отверстия

в сплошном металле является сверление, то при $d_{\text{св.мах}} = 25$ мм максимальная длина сверления $l_{\text{отв}} = 250$ мм ($l/d < 10$). Вместе с тем, согласно ГОСТ 2092–77, длина рабочей части сверла принятого

диаметра составляет 245 мм. В этом случае длина исследуемого теоретически отверстия $l_{\text{отв}} = 240$ мм, что соответствует соотношению $l/d < 9,6$.

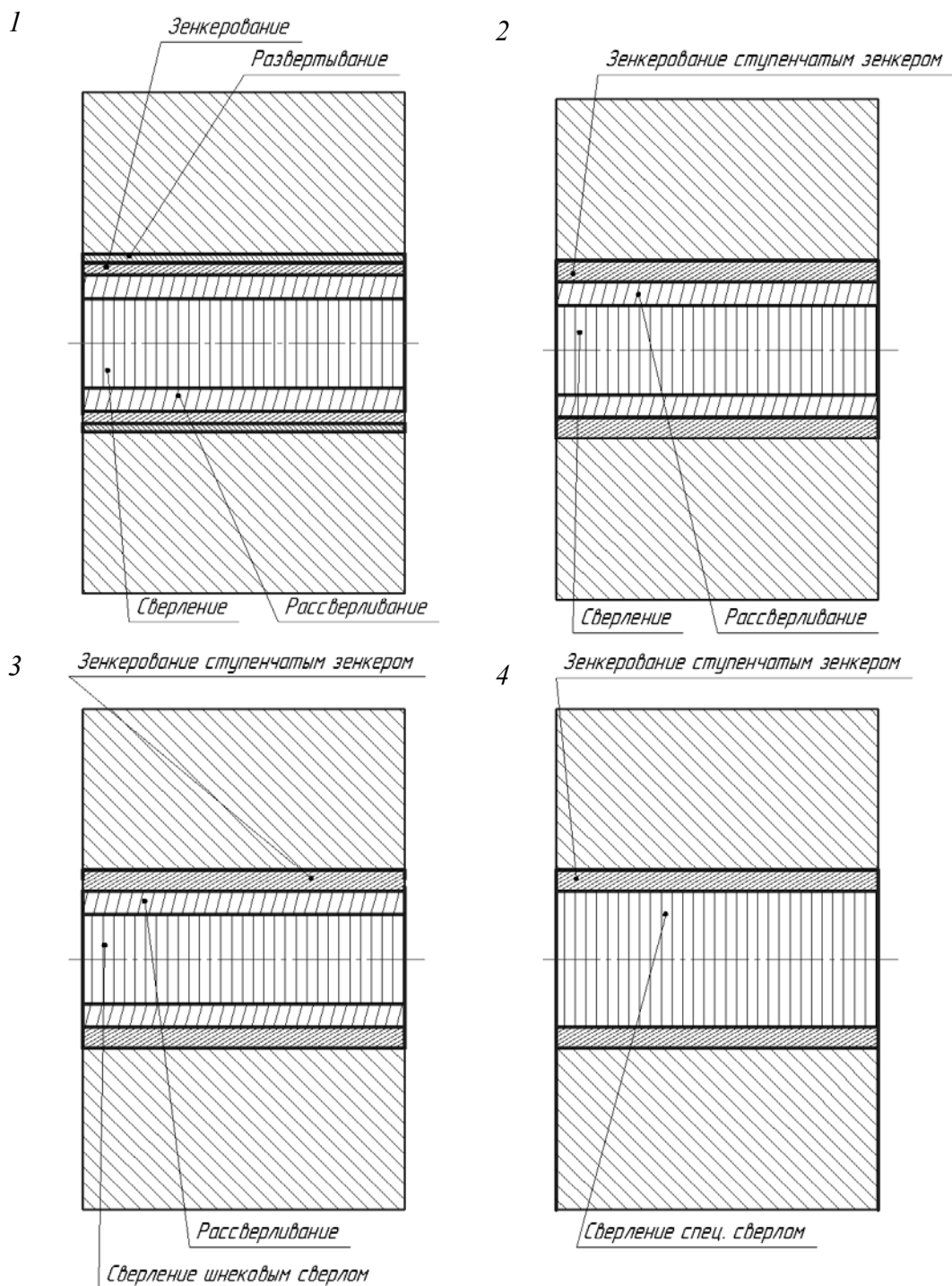


Рис. 1. Варианты обработки отверстия

Принятые варианты обработки отверстия $\varnothing 40$ мм и длиной $l = 240$ мм.

Вариант 1: сверление отверстия спиральным сверлом $\varnothing 25$ мм $\rightarrow$ рассверливание до $\varnothing 38$ мм [13] $\rightarrow$ зенкерование до $\varnothing 39,6$ мм (зенкер насадной [14]) $\rightarrow$ развертывание до $\varnothing 40$ мм (Н8) (развертка насадная [15]).

Вариант 2: сверление $\varnothing 25$ мм $\rightarrow$ рассверливание до $\varnothing 38$ мм $\rightarrow$ зенкерование ступенчатым зенкером до $\varnothing 40$ мм (Н8).

Вариант 3: сверление шнековым сверлом $\varnothing 25$ мм (предполагается использование специального шнекового сверла в связи с тем, что согласно ТУ 2-035-948–84 и ТУ 2-035-425–75 подобный инструмент изготавливается до $\varnothing 14$ мм) $\rightarrow$ рассверливание до $\varnothing 38$ мм $\rightarrow$ зенкерование ступенчатым зенкером до $\varnothing 40$ мм (Н8).

Вариант 4: сверление $\varnothing 38$ мм спец. сверлом, состоящим из рабочей части со сменной твердосплавной головкой $\rightarrow$ зенкерование ступенчатым зенкером до $\varnothing 40$ мм (Н8).

Конструкция специального сверла, представленная в варианте 4, также может использоваться и для обработки отверстий, длина которых не превышает четырех диаметров.

Для определения оптимального варианта обработки в первую очередь рассчитывались параметры режимов обработки и трудоемкости, представленные в табл. 1.

Исходя из табл. 1 определяется оптимальный вариант обработки по затратам основного времени и работы. Для варианта 1 – $T_{o1} = 726,2$ с, $A_1 = 752,9$ кДж; для варианта 2 – $T_{o2} = 436,8$ с, $A_2 = 749$ кДж; для варианта 3 – $T_{o3} = 393,7$ с, $A_3 = 747,7$ кДж; для варианта 4 – $T_{o4} = 190,9$ с, $A_4 = 430,8$ кДж.

Как видно из табл. 1, четвертый вариант обработки отверстия $\varnothing 40$ мм с основным временем $T_o = 190,9$ с и работой $A = 430,8$ кДж является наиболее эффективным.

Таким образом, суть представленного выше примера заключалась в нахождении наивыгоднейшего с точки зрения комплексного показателя основное время T_o + работа A варианта обработки относительно длинного отверстия. Вместе с тем, предложенный способ определения оптимальной технологии справедлив и для ситуаций, возникающих и при обработке отверстий малой длины ($l/d < 4$). Все указанные выше отверстия характеризуются как гладкие. Совокупность нескольких гладких отверстий, расположенных на одной оси последовательно от большего диаметра к меньшему, образуют так называемое ступенчатое отверстие. Следовательно, представленную логическую цепочку можно использовать при анализе его возможных процессов формообразования, не исключая и вариант растачивания и расфрезеровывания отверстий большего диаметра. Однако для этого необходимо ее описать в общем виде, т. е. разработать теоретические основы структурной оптимизации ступенчатого отверстия.

Теоретические основы структурной оптимизации

В основе комплексного показателя оптимизации вариантов обработки отверстия, как ранее указывалось, лежит идея поиска наилучшей технологии его формирования на основе минимизации основного времени T_o и работы A , затрачиваемых на обработку поверхностей. Указанные критерии находятся по следующим формулам.

Основное время

$$T_o = \frac{l_p}{S_m} \cdot i, \quad (1)$$

где l_p – длина рабочего хода инструмента в направлении подачи, мм; S_m – минутная подача, мм/мин; i – число рабочих ходов.

Табл. 1. Параметры обработки вариантов 1–4

Технологический переход		Наименование параметра								
		Скорость резания V , м/мин	Количество рабочих ходов i	Подача за оборот F , мм/об	Частота вращения шпинделя n , мин ⁻¹	Минутная подача S_0 , мм/мин	Глубина резания t , мм	Мощность резания P , кВт	Время обработки T , с	Работа $A = Pt$, кДж
Вариант 1										
Сверление отверстия спиральным сверлом до Ø25 мм, $L = 240$ мм		44	1	0,2	556	111	12,5	2,88	134,9	388,5
Рассверливание до Ø38 мм, $L = 240$ мм		50	1	0,25	417	104	6,5	2,21	143,8	317,8
Зенкерование до Ø39,6 мм, $L = 240$ мм		23	1	0,7	186	130	0,8	0,36	115,0	41,4
Развертывание до Ø40 мм (H8), $L = 240$ мм	предварительное	9	1	1,12	69	73	0,15	0,02	184,3	3,7
	окончательное	11	1	1,12	90	101	0,05	0,01	148,2	1,5
Σ								5,48	726,2	752,9
Вариант 2										
Сверление отверстия спиральным сверлом до Ø25 мм, $L = 240$ мм		44	1	0,2	556	111	12,5	2,88	134,9	388,5
Рассверливание до Ø38 мм, $L = 240$ мм		50	1	0,25	417	104	6,5	2,21	143,8	317,8
Зенкерование ступенчатым зенкером до Ø40 мм (H8), $L = 240$ мм		23	1	0,7	186	130	0,8	0,36	115,0	41,4
Σ								5,45	393,7	747,7
Вариант 3										
Сверление отверстия шнековым сверлом до Ø25 мм, $L = 240$ мм		29	1	0,2	421	84	12,5	2,19	178,0	389,8
Рассверливание до Ø38 мм, $L = 240$ мм		50	1	0,25	417	104	6,5	2,21	143,8	317,8
Зенкерование ступенчатым зенкером до Ø40 мм (H8), $L = 240$ мм		23	1	0,7	186	130	0,8	0,36	115,0	41,4
Σ								4,76	436,8	749
Вариант 4										
Сверление спец. сверлом до Ø38 мм, $L = 100$ мм		118	1	0,2	988	198	19	5,13	75,9	389,4
Зенкерование ступенчатым зенкером до Ø40 мм (H8), $L = 240$ мм		23	1	0,7	186	130	0,8	0,36	115,0	41,4
Σ								5,49	190,9	430,8

Работа

$$A = (P \cdot T_0) \cdot i, \quad (2)$$

где P – мощность, затрачиваемая на элементарный переход, кВт.

В соответствии с рис. 1 принято четыре варианта формирования отвер-

стей. Предварительно можно предположить, что основное время для каждого из этих вариантов известно, что дает возможность сравнения их по T_o и определения варианта с наименьшим временем формирования отверстия, который и будет оптимальным.

$$T_{o1} < T_{o2}. \quad (3)$$

Далее на основе теории оптимизации [16–18] приводится анализ по сравнению принятых вариантов обработки отверстий, в том числе и относительно длинных, в вышеуказанных целях для минимизации затрат энергии и оптимизации производительности.

Предполагается, что изначально основное время T_{o1} является минимальным, тогда по данному критерию

$$\begin{cases} T_{o1} = T_{o \min}; \\ T_{o \min} < T_{o2} = \text{истина}. \end{cases} \quad (4)$$

Однако существует возможность того, что меньшее основное время будет соответствовать второму варианту:

$$\begin{cases} T_{o1} = T_{o \min}; \\ T_{o1} < T_{o2} = \text{ложь}; \\ T_{o2} = T_{o \min}. \end{cases} \quad (5)$$

$$W_{s+1} = \min \text{ при } (T_{o \min} = T_{o(s+1)}) \& (A_{\min} = A_{s+1}) = \text{истина};$$

$$T_{o(s+1)} \in W_{s+1}; A_{s+1} \in W_{s+1}. \quad (8)$$

Однако возможны следующие случаи, возникающие при определении оптимального варианта обработки.

1. При минимальном основном времени $T_{o \min}$ работа A_{s+1} не является таковой и наоборот: $T_{o \min} \in W_{(s+1)T_{o \min}}$; $A_{\min} \notin W_{(s+1)T_{o \min}}$; $T_{o \min} \notin W_{sA_{\min}}$; $A_{\min} \in W_{sA_{\min}}$.

2. У нескольких вариантов обработки либо основное время, либо работа являются минимальными и одинаковы-

Аналогично сравниваются третий и четвертый варианты.

Пусть W_s – ступень отверстия, s – номер варианта обработки ступени (на рис. 1 четыре варианта обработки одного отверстия – соответственно W_1, W_2, W_3, W_4), $s = 1 \dots n$ (n – номер крайнего варианта обработки).

Тогда условие (4), объединенное с условием (5), приобретет вид:

$$\begin{cases} T_{o \min} = T_{os}, s = 1 \dots n; \\ T_{o(s+1)} < T_{o \min}; \\ T_{o \min} = T_{o(s+1)}; \\ T_{os} \in W_s; T_{o(s+1)} \in W_{(s+1)}. \end{cases} \quad (6)$$

Соответственно, аналогичное условие верно и для работы, затраченной на обработку:

$$\begin{cases} A_{\min} = A_s, s = 1 \dots n; \\ A_{s+1} < A_{\min}; \\ A_{\min} = A_{s+1}; \\ T_{os} \in W_s; T_{o(s+1)} \in W_{(s+1)}. \end{cases} \quad (7)$$

Если и основное время, и работа для одного и того же варианта обработки являются наименьшими, то он оптимален. Пусть $T_{o(s+1)} = \min$, $A_{s+1} = \min$, $s = 1 \dots n$ и $T_{o(s+1)} \in W_{s+1}$, $A_{s+1} \in W_{s+1}$, тогда вариант обработки W_{s+1} является оптимальным:

$$\text{ми: } T_{os} = T_{o(s+1)} = T_{o \min}; T_{o(s+1)} \in W_{(s+1)}; T_{os} \in W_s \text{ или } A_s = A_{(s+1)} = A_{\min}; A_s \in W_s, A_{s+1} \in W_{(s+1)}.$$

Тогда подлежат более подробному рассмотрению все случаи.

В первом случае дальнейшее рассуждение проводится следующим образом.

Возникнувшие варианты обработки являются оптимальными лишь по

одному из критериев, следовательно, они становятся граничными и сужают область поиска. То есть $T_{o \min} =$

$$= T_{o(s+1)} \in W_{(s+1)T_{o \min}}, A_{s+1} \notin W_{(s+1)T_{o \min}}, T_{os} \notin W_{sA_{\min}}, A_{\min} = A_s \in W_s;$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{o \min} \leq T_{o_j \min} \leq T_{os}(A_{\min}); \\ A_{\min} \leq A_{j \min} \leq A_{s+1}(T_{o \min}); \\ T_{o \min} = T_{o(s+1)} \in W_{(s+1)T_{o \min}}, A_{s+1} \notin W_{(s+1)T_{o \min}}, T_{os} \notin W_{sA_{\min}}, A_{\min} = A_s \in W_s, \end{array} \right. \quad (9)$$

где $T_{o_j \min}$, $A_{j \min}$ – основное время и работа, принадлежащие оптимальному варианту на новом множестве j .

Исходя из условия (9) всё множество исходных вариантов обработки либо сокращается до одного единственного, находящегося в этом промежутке (он и будет искомым оптимальным), либо до множества j , которое включает в се-

бе несколько оптимальных вариантов обработки. Далее при использовании зависимостей (6)–(8), но уже для множества j образуется еще одно множество с более ограниченным диапазоном. Эту последовательность надо повторить до тех пор, пока не найдется оптимальный вариант обработки:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{s+1} = \min \text{ при } (T_{o(s+1)} = T_{o \min}) \& (A_{(s+1)} = A_{\min}) = \text{истина}; \\ T_{o(s+1)} \in W_{s+1}; A_{s+1} \in W_{s+1}; s = 1...n; \\ \text{если } T_{o \min} = T_{o(s+1)} \in W_{(s+1)T_{o \min}}; A_{\min} = A_{(s+1)} \notin W_{(s+1)T_{o \min}} \text{ или } T_{os} \notin W_{sA_{\min}}; \\ A_{\min} = A_s \in W_{sA_{\min}}, \text{ то} \\ T_{o \min} \leq T_{o_j \min} \leq T_{os}, \\ A_{\min} \leq A_{j \min} \leq A_{s+1}; \\ W_j = \min \text{ при } (T_{oj} = T_{o_j \min}) \& (A_j = A_{j \min}) = \text{истина}; \\ T_{oj} \in W_j; A_j \in W_j; j = 1...m; j \in s; W_j \in W_s. \end{array} \right. \quad (10)$$

Однако возможен случай, когда между двумя оптимальными по одному из критериев вариантами нет никакой области поиска. То есть возникает следствие из первого пункта, когда оптимальными являются два варианта обработки. Тогда наилучший вариант опре-

деляется исходя из наименьшего процентного соотношения между первым оптимальным параметром, принадлежащим первому варианту, и параметром, принадлежащим второму варианту при оптимальном втором варианте:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{s+1} = \min \text{ при } (T_{o(s+1)} = T_{o \min}; \Delta_{A_{s+1}} = \min) \text{ или } (A_s = A_{\min}; \Delta_{T_{os}} = \min) = \text{истина}; \\ \text{для первого условия: } \Delta_{A_{s+1}} = \frac{A_{s+1}}{A_{\min}} \cdot 100\% - 100\%; A_{s+1} \in W_{(s+1)}; A_s \in W_s; s = 1...n; \\ \text{для второго условия: } \Delta_{T_{os}} = \frac{T_{os}}{T_{o \min}} \cdot 100\% - 100\%, T_{os} \in W_s; T_{o(s+1)} \in W_{s+1}; s = 1...n. \end{array} \right. \quad (11)$$

Во втором случае в связи с тем, что один из оптимальных критериев для нескольких вариантов технологии является одинаковым, решающее значение получает другой критерий. Соответ-

ственно, в таком случае из всех вариантов обработки оптимальным будет тот, для которого второй критерий будет иметь меньшее значение:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{s+1} = \min; \\ \text{если } A_{s+1} = A_s = A_{\min}, \text{ то } T_{o(s+1)} = T_{o \min}; \\ \text{или} \\ \text{если } T_{o(s+1)} = T_{os} = T_{o \min}, \text{ то } A_{s+1} = A_{\min}; \\ A_{s+1} \in W_{(s+1)}; A_s \in W_s; T_{o(s+1)} \in W_{(s+1)}; T_s \in W_s; s = 1 \dots n. \end{array} \right. \quad (12)$$

В общем виде условие выбора оптимального варианта обработки одной

ступени по основному времени и работе, затрачиваемой на него, имеет вид:

$$W_{s+1} = \min \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} ((T_{o(s+1)} = T_{o \min}) \& (A_{s+1} = A_{\min})), \text{ или} \\ ((T_{oj} = T_{o \min}) \& (A_j = A_{\min})), \text{ или} \\ ((T_{o(s+1)} = T_{o \min}; \Delta_{A_{s+1}} = \min) \& \\ \text{или } (A_s = A_{\min}; \Delta_{T_{os}} = \min)), \text{ или} \\ ((\text{если } A_{s+1} = A_s = A_{\min}, \text{ то } T_{o(s+1)} = T_{o \min}) \& \\ \text{или } (\text{если } T_{o(s+1)} = T_{os} = T_{o \min}, \text{ то } A_{s+1} = A_{\min})); \\ T_{o(s+1)} \in W_{s+1}; A_{s+1} \in W_{s+1}, s = 1 \dots n; j = 1 \dots m; \\ T_{oj} \in W_j; A_j \in W_j; W_j \in W. \end{array} \right. \quad (13)$$

Поскольку в настоящей части работы рассмотрению подлежит ступенчатое отверстие, то в случае, когда отверстие имеет две и более ступени, необходимо ввести переменную k , обо-

значающую количество ступеней отверстия. Соответственно, для каждой ступени будет свое количество вариантов обработки.

$$W_{k(s+1)} = \min, \quad k = 1 \dots l \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} ((T_{o k(s+1)} = T_{o k \min}) \& (A_{k(s+1)} = A_{k \min})), \text{ или} \\ ((T_{okj} = T_{o k \min}) \& (A_{kj} = A_{k \min})), \text{ или} \\ ((T_{o k(s+1)} = T_{o k \min}; \Delta_{k A_{s+1}} = \min) \& \\ \text{или } (A_{ks} = A_{k \min}; \Delta_{k T_{os}} = \min)), \text{ или} \\ ((\text{если } A_{k(s+1)} = A_{ks} = A_{k \min}, \text{ то } T_{o k(s+1)} = T_{o k \min}) \& \\ \text{или } (\text{если } T_{o k(s+1)} = T_{oks} = T_{o k \min}, \text{ то } A_{k(s+1)} = A_{k \min})); \\ T_{o k(s+1)} \in W_{k(s+1)}; A_{k(s+1)} \in W_{k(s+1)}, s = 1 \dots n; j = 1 \dots m; \\ T_{okj} \in W_{kj}; A_{kj} \in W_{kj}; W_{kj} \in W_{ks}. \end{array} \right. \quad (14)$$

Таким образом, разработаны теоретические основы структурной опти-

мизации вариантов технологий обработки ступенчатых и гладких отверстий

на основе комплексного критерия основное время T_0 + работа A .

Результаты исследований, изложенные в двух последних разделах настоящей работы, служат основанием для создания САПР ТП, оптимизирующих условия формирования гладких и ступенчатых отверстий лезвийным инструментом.

Выводы

1. Технологические процессы формирования отверстий лезвийным инструментом, в том числе и относительно длинных ($4 < l/d < 10$) с точностью порядка восьмого качества, сведены к четырем вариантам с определе-

нием наиболее оптимального по комплексному критерию основное время T_0 + работа A , затрачиваемые на обработку.

2. На основании использования комплексного критерия оптимизации основное время T_0 + работа A для вариантов формирования отверстий разработаны теоретические основы структурной оптимизации технологических процессов обработки как гладких, так и ступенчатых отверстий.

3. Основы настоящей работы могут в дальнейшем быть использованы для создания САПР технологических процессов, оптимизирующих условия формирования отверстий лезвийным инструментом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков, А. В. Теоретическое обоснование и технологическое обеспечение точности токарной обработки ступенчатых валов на основе структурно-параметрической оптимизации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / А. В. Казаков; Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2016. – 22 с.
2. Жолобов, А. А. Структурная оптимизация токарной операции растачивания при формировании ступенчатых отверстий / А. А. Жолобов, А. В. Казаков, Д. В. Боярко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3. – С. 16–26.
3. Латыпов, А. И. Особенности высокоскоростного фрезерования отверстий / А. И. Латыпов // 54 студенч. науч.-техн. конф. Белорус.-Рос. ун-та. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 109.
4. Дуюн, Т. А. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления изделий с использованием метода динамического программирования / Т. А. Дуюн, А. В. Гринек, Д. В. Сахаров // Вестн. им. В. Г. Шухова. – 2013. – № 3. – С. 61–65.
5. Аверченков, В. И. Математическое моделирование процессов управления качеством изготовления изделий с учетом технологической наследственности / В. И. Аверченков // Транспортное машиностроение. – 2020. – № 3. – С. 47–56.
6. Скуратов, Д. Л. Модель структурно-параметрической оптимизации технологического процесса механической обработки на стадии его проектирования / Д. Л. Скуратов, С. Ю. Сидоров // Вестн. СГАУ. – 2006. – № 2–2. – С. 343–346.
7. Ларин, Н. В. Обеспечение требуемых показателей техпроцесса путем создания оптимальной его структуры / Н. В. Ларин, А. Н. Селиванов // Вестн. магистратуры. – 2019. – № 10–2. – С. 23–25.
8. Павлова, А. Н. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов / А. Н. Павлова, О. В. Кузнецова // Соврем. наукоемкие технологии. Регион. прилож. – 2021. – № 1. – С. 78–87.
9. Клепцов, А. А. Методика параметрической оптимизации технологических процессов при обеспечении характеристик поверхностного слоя деталей / А. А. Клепцов, Л. Н. Клепцова // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2020. – № 4. – С. 9–17.
10. Янковская, Т. А. О задачах структурно-параметрического синтеза при проектировании сложных технических систем / Т. А. Янковская // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 1. – С. 170–175.
11. Pangestu, P. Multi-objective cutting parameter optimization model of multi-pass turning in CNC machines for sustainable manufacturing / P. Pangestu, E. Pujiyanto, C. N. Rosyidi // Heliyon. – 2021. – № 7 (2).
12. Srinivasan, R. B. Multi-response optimization of machining parameters for end milling process on BSL168-T6511 aluminium alloy using Taguchi based grey relational analysis / R. B. Srinivasan, B. Ch. Kanna, N. H. Shivananda // Al-Khwarizmi Engineering Journal. – 2021. – Vol. 17 (3). – P. 1–12.
13. Сверла спиральные удлиненные с коническим хвостовиком: ГОСТ 2092–77. – Введ. 01.01.79. – Москва: Гос. ком. стандартов Совета Министров СССР; Изд-во стандартов, 1979. – 5 с.

-
14. Зенкеры: ГОСТ 12489–71. – Введ. 01.07.72. – Москва: Гос. ком. стандартов Совета Министров СССР; Изд-во стандартов, 1972. – 25 с.
 15. Развертки: ГОСТ 1672–80. – Введ. 01.07.82. – Москва: Гос. ком. стандартов Совета Министров СССР; Изд-во стандартов, 1982. – 14 с.
 16. **Щитов, И. Н.** Введение в методы оптимизации: учебное пособие / И. Н. Щитов. – Москва: Высшая школа, 2008. – 209 с.
 17. **Корнеенко, В. П.** Методы оптимизации: учебник / В. П. Корнеенко. – Москва: Высшая школа, 2007. – 664 с.
 18. **Колтунов, И. И.** Моделирование и оптимизация процессов управления в технологических системах: учебник / И. И. Колтунов, Т. Г. Крыжановская. – Москва: КноРус, 2021. – 326 с.

Статья сдана в редакцию 25 апреля 2023 года

Ольга Николаевна Кляус, магистр техн. наук, аспирант, Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-29-845-19-00. E-mail: klyaus.olya@yandex.by.

Александр Алексеевич Жолобов, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Olga Nikolaevna Klyaus, Master Sc. (Tech.), post-graduate student, Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-29-845-19-00. E-mail: klyaus.olya@yandex.by.

Aliaksandr Alekseyevich Zholobov, Cand. Sc. (Tech.), Professor, Belarusian-Russian University.