

УДК 621.9

А. А. Жолобов, А. В. Казаков, Д. В. Боярко

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТОКАРНОЙ ОПЕРАЦИИ РАСТАЧИВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТУПЕНЧАТЫХ ОТВЕРСТИЙ

UDC 621.9

A. A. Zholobov, A. V. Kazakov, D. V. Boyarko

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF BORING OPERATION IN FORMATION OF STEPPED HOLES

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы теоретического обоснования и технологического обеспечения высокоэффективной токарной обработки ступенчатых отверстий в деталях машин на основе структурной оптимизации, базирующейся на выборе рационального варианта снятия припуска. Показана рациональность использования поперечных ходов режущего инструмента при растачивании ступенчатых отверстий.

Ключевые слова:

структурная оптимизация, обработка, производительность, элементарные части, припуск, технологический переход, граф, элементы множества.

Abstract

The paper considers the issues of theoretical justification and technology support for high-efficiency turning of stepped holes in machine parts based on the structural optimization due to the choice of rational option for stock allowance removal. The rationality of using transverse movements of the cutting tool for boring stepped holes is shown.

Key words:

structural optimization, processing, efficiency, elementary parts, allowance, machining step, graph, elements of the set.

Основой функционирования производственного процесса является технологический процесс (ТП) – полная последовательность операций и технологических переходов, которые необходимо выполнить в заданных условиях с целью получения конечного продукта требуемого качества в нужном количестве. При разработке технологических процессов принято для каждой операции механической обработки определять точность. Расчёт точности обработки, на первый взгляд, является несложной задачей, если не принимать во внимание то, что может существовать множество вариантов выполнения од-

ной и той же операции в сочетании с возможностью многовариантного назначения режимов резания. Другими словами, одну и ту же операцию можно выполнить по разным вариантам съёма металла с варьированием режимами резания в широком диапазоне. Поверхности одного и того же ступенчатого отверстия можно получить различными вариантами выполнения технологической операции, каждый из которых представляет сочетание элементарных технологических переходов, необходимых для осуществления операции.

Структурная оптимизация технологических переходов в статье рассмат-



ривается как процесс, в результате которого определяется последовательность рабочих и вспомогательных ходов режущего инструмента с целью минимизации основного времени обработки.

При многовариантности последовательности выполнения переходов оптимизация процесса удаления припуска при формировании ступенчатых валов позволяет уменьшить время обработки на 15...20 % и более [1].

В работе рассматривается постановка и решение задачи определения вариантов обработки применительно к точению ступенчатых отверстий на то-

карном станке с ЧПУ.

Для определения количества вариантов обработки на токарной операции при любом n ступеней операционный припуск можно закодировать в виде элементарных частей Z_{ij} , каждая из которых ограничена образующими цилиндрами и торцами ступеней отверстия. Пример представления операционного припуска в виде элементарных частей Z_{ij} при обработке трёх ступеней отверстия ($n = 3$) диаметрами D_1, D_2, D_3 из заготовки диаметром $D_{\text{заг}}$ показан на рис. 1.

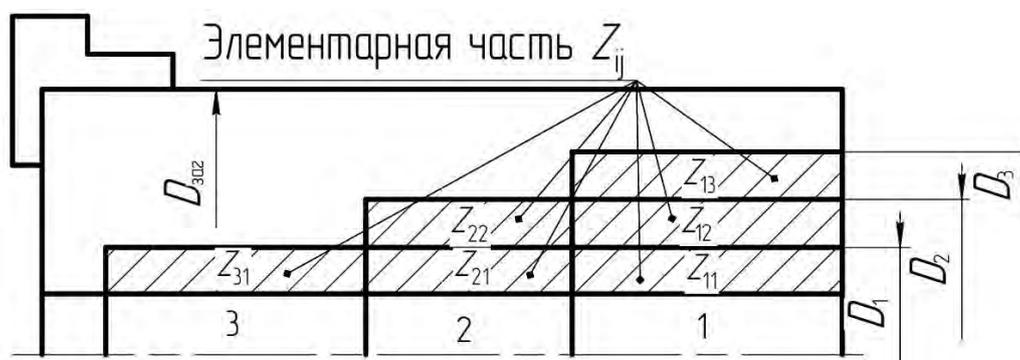


Рис. 1. Схема разбиения общего припуска трехступенчатого отверстия на элементарные части

Припуск, удаляемый на каждом технологическом переходе, условно можно представить состоящим из одной или нескольких таких элементарных частей. Всевозможные варианты объединения элементарных частей Z_{ij} в припуск k -й ступени ($1 \leq k \leq n$) могут быть заданы уравнением

$$P_{klm} = \sum_{i=l}^k \sum_{j=k}^m (Z_{ij}), \quad (1)$$

где k – номер ступени, $k = 1, 2, \dots, n$; l – номер крайней правой ступени, объединенной с k -й ступенью по длине, $l = 1, 2, \dots, k$; m – номер ступени большего диаметра из ступеней, объединённых припуском по длине, $m = k, k + 1, \dots, n$.

Таким образом, для $n = 3$ припуски

ступеней имеют следующую структуру:

– припуски первой ступени –
 $P_{111} = \{Z_{11}\}$, $P_{112} = \{Z_{11}, Z_{12}\}$,
 $P_{113} = \{Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}\}$;

– припуски второй ступени –
 $P_{212} = \{Z_{21}, Z_{22}\}$, $P_{222} = \{Z_{11}, Z_{12}, Z_{21}, Z_{22}\}$,
 $P_{211} = \{Z_{21}\}$, $P_{221} = \{Z_{21}, Z_{11}\}$;

– припуски третьей ступени –
 $P_{331} = \{Z_{11}, Z_{21}, Z_{31}\}$, $P_{321} = \{Z_{31}, Z_{21}\}$,
 $P_{311} = \{Z_{31}\}$.

Уравнение (1) кодирует состав припусков каждой обрабатываемой ступени, которые она может образовывать, но не описывает, как эти припуски могут быть объединены в определённые варианты обработки. В дальнейшем вариант обработки представлен как упрощённое множество $\Omega = \{(P_{klm})_i\}$, в котором находится

только по одному припуску каждой ступени. Согласно полученным результатам для трёх обрабатываемых ступеней, первая ступень образует три припуска, вторая – четыре, третья – три. Общее число вариантов равно произведению количества припусков, которые может образовывать каждая из ступеней, т. е. $3 \cdot 4 \cdot 3 = 36$. Очевидно то, что для любого варианта обработки элементарная часть Z_{ij} не может одновременно входить в состав двух и более припусков ступеней (например, вариант обработки $\Omega_{16} = \{P_{112}, P_{212}, P_{331}\}$ состоит из следующих припусков: $P_{112} = \{Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}\}$; $P_{211} = \{Z_{21}\}$; $P_{331} = \{Z_{31}, Z_{21}, Z_{31}\}$).

В противном случае будут возникать области пересечения или пустотные области. В первом случае, при возникновении области пересечения, режущий инструмент будет осуществлять перемещение на рабочей подаче в области, где слой металла удалён на предыдущих технологических переходах. Этот вариант обработки приведёт к дополнительным затратам основного времени. Во втором случае, при возникновении пустотной области, в ней остаётся слой металла, препятствующий перемещению режущего инструмента, что может привести к аварийной ситуации.

Таким образом, возникает задача определения всех допустимых вариантов обработки. Решение этой задачи состоит из двух этапов [2]:

- построение графа, вершинами которого являются припуски ступеней;
- проверка возможности образования допустимого варианта обработки из элементов множества Ω_i , формируемого из каждой ветви графа.

Для первого этапа воспользуемся матрицей (рис. 2, а), в которой число столбцов k -й строки определяется зависимостью $k \cdot (n+1-k)$, а число строк равно n . Для её заполнения разработан и применяется алгоритм (рис. 2, б), осно-

ванный на уравнении (1). Элементы матрицы формируются из обозначений (кодов) припусков ступеней, причём в первую строку помещаются припуски первой ступени, во вторую – припуски второй ступени и т. д.

Для построения графа из матрицы обозначений (кодов) припусков последовательно каждый элемент каждой строки «связывается» дугой со всеми элементами нижестоящей строки. Таким образом, формируются исходные данные для проверки возможности образования допустимого варианта обработки из множества Ω_i . Результаты построения графа для трёх обрабатываемых ступеней на основании множеств ($\Omega_1 - \Omega_{36}$) представлены на рис. 3.

Для проверки возможности каждой ветви графа образуются допустимый вариант обработки строится матрица размером $(n \times n)$ (рис. 3, а). В этой матрице выше главной диагонали лежат элементы, представляющие собой элементарные части Z_{ij} . Например, элемент матрицы $X = 1, Y = 3$ соответствует элементарной части Z_{13} .

Тогда припуск k -й ступени P_{klm} будет представлять собой прямоугольник, состоящий из элементов матрицы, верхний левый угол которого имеет координаты $X = k, Y = k$, а нижний правый – $X = 1, Y = m$ (рис. 4).

Так как каждая элементарная часть Z_{ij} занимает в матрице одну позицию, то и её площадь равна единице независимо от размеров ступеней отверстия. В этом случае площадь припуска любой ступени в матрице равна количеству элементарных частей, входящих в данный припуск, а формула для определения площади припуска ступени имеет следующий вид:

$$F(P_{klm}) = ((k-l)+1) \cdot ((m-k)+1). \quad (2)$$

Например, площадь припуска $F(P_{331}) = 3$, площадь припуска $F(P_{221}) = 2$.

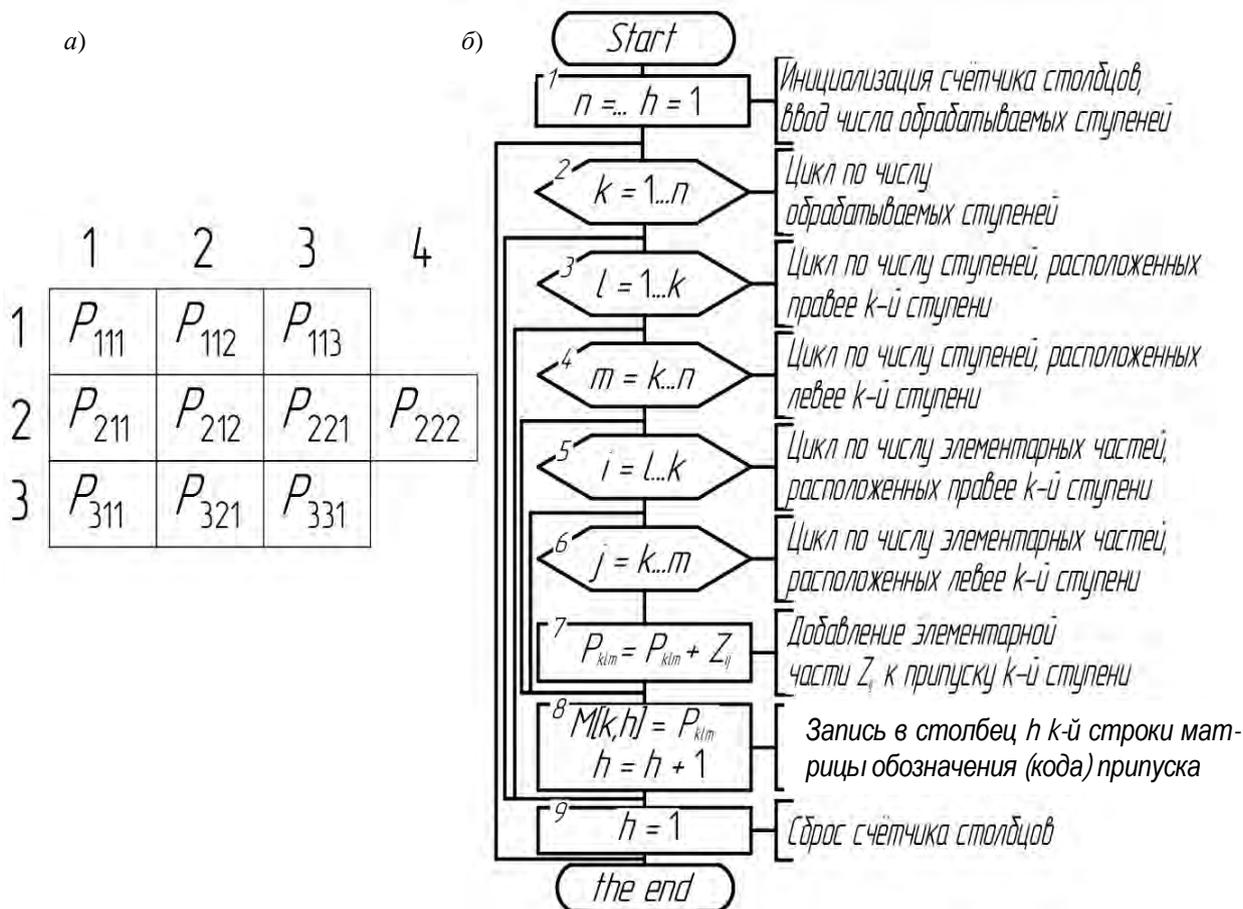


Рис. 2. Матрица и блок-схема алгоритма: а – пример матрицы для построения графа ($n = 3$); б – блок-схема алгоритма заполнения матрицы

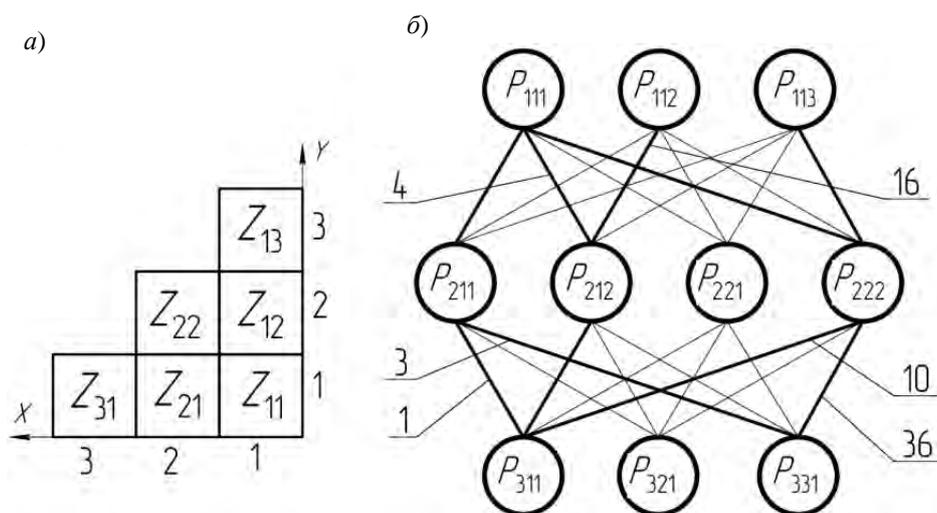


Рис. 3. Матрица и граф припусков: а – матрица единичных элементов; б – граф обозначений (кодов) припусков

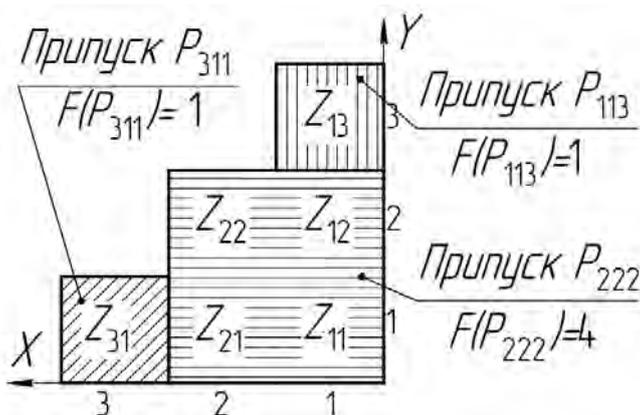


Рис. 4. Представление припусков ступеней в виде элементов матрицы

Общая площадь $F(n)$ для n ступеней равна общему количеству элементарных частей Z_{ij} :

$$F(n) = \sum_{i=1}^n i \quad (3)$$

или

$$F(n) = \frac{n^2 + n}{2} \quad (4)$$

Далее рассмотрены недопустимые варианты обработки, представленные на рис. 5. Вариант обработки ступеней будет являться недопустимым, если суще-

ствует хотя бы два пересекающихся припуска, содержащих общую часть Z_{ij} (рис. 5, а), или суммарная площадь припусков ступеней данного варианта обработки не соответствует площади общего припуска $F(n)$, определяемой по (4) (рис. 5, б). Необходимым условием включения припуска ступени в допустимый вариант обработки является отсутствие у данного припуска элементарных частей, входящих в другие припуски ступеней рассматриваемого варианта обработки.

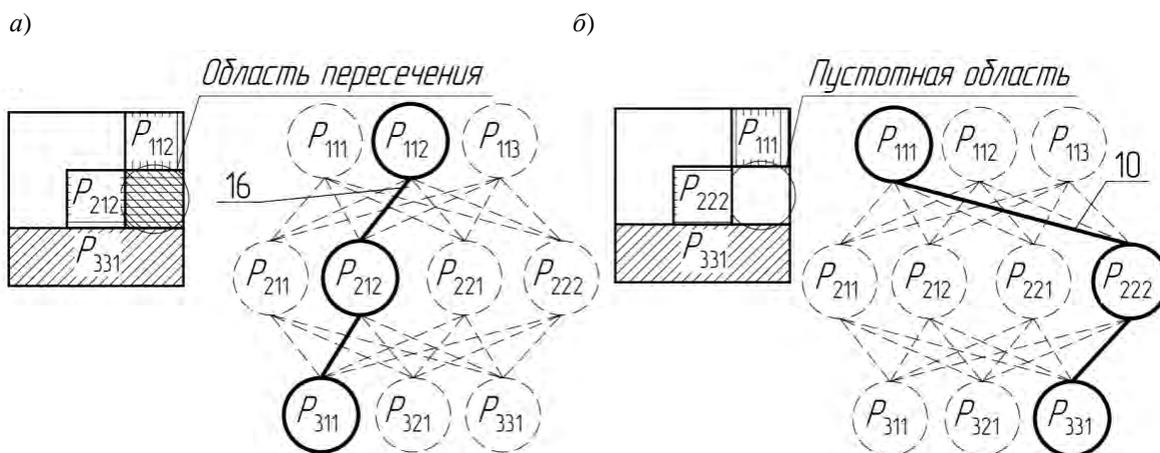


Рис. 5. Примеры недопустимых вариантов обработки и их дуг в графе: а – образование области пересечения; б – образование пустотной области



Для сравнения кодов двух припусков одного варианта разработана логическая функция проверки на принадлежность элементарных частей первого припуска второму. Логическая функция не зависит от условий, учитывающих геометрические особенности поверхностей, требуемую точность обработки, качество поверхностного слоя детали, размер партии, габариты детали. Если припуск P_{klm} должен содержать фиксированный набор элементарных частей

($\{Z_{ij} \in P_{klm}\}$), то в общем случае логическая функция подчиняется нижеследующим условиям.

Припуск $P_{k_w l_w m_w} \in \Omega_s$ (рис. 6) не будет иметь общих с рассматриваемым припуском $P_{k_r l_r m_r} \in \Omega_s$ элементарных частей Z_{ij} , если он лежит правее (рис. 6, а) или выше рассматриваемого припуска $P_{k_r l_r m_r}$ (рис. 6, б) при $k_r < k_w$. То есть $(k_r < k_w) \vee ((l_r > k_w) \wedge (m_w < k_r))$.

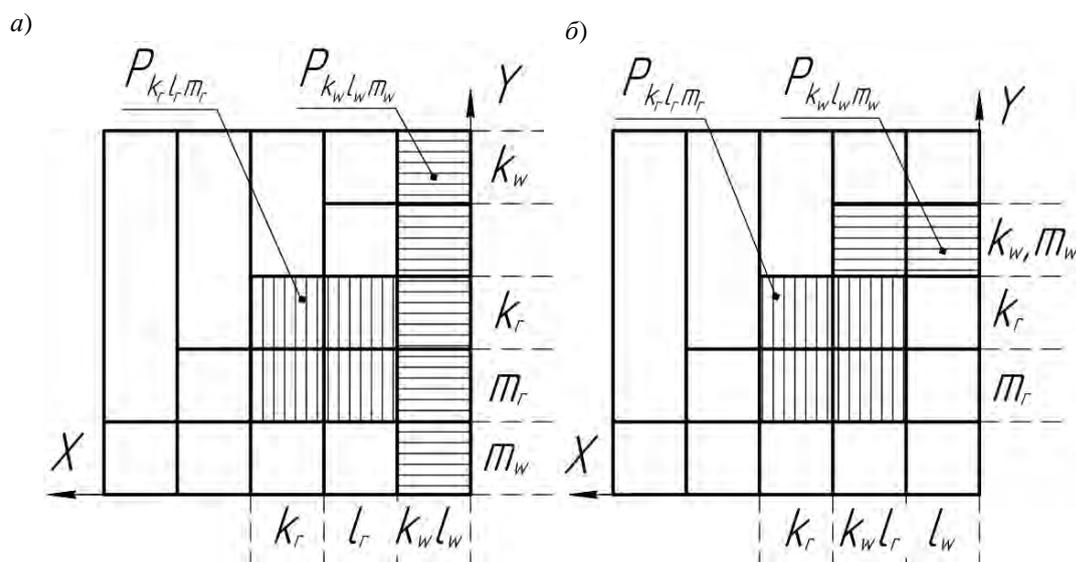


Рис. 6. К определению логической функции при $k_r < k_w$: а – припуск $P_{k_w l_w m_w}$ лежит правее $P_{k_r l_r m_r}$; б – припуск $P_{k_w l_w m_w}$ лежит выше $P_{k_r l_r m_r}$

При $k_r > k_w$ припуск $P_{k_w l_w m_w} \in \Omega_s$ не будет иметь общих с рассматриваемым припуском $P_{k_r l_r m_r} \in \Omega_s$ элементарных частей Z_{ij} , если он лежит выше (рис. 7, а) или правее рассматриваемого

(рис. 7, б). То есть $(k_r > k_w) \vee ((m_r < k_w) \wedge (l_w > k_r))$.

В общем виде функция определения допустимых вариантов обработки $\Omega_{s\delta}$ имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_{s\delta} = \bigcup_{i=1}^{n-1} \{P_{k_r l_r m_r}\}, \text{ при} \\ (k_r < k_w) \vee (l_r < k_w) \wedge (m_w > k_r) \vee \\ (k_r < k_w)(m_r > k_w)(l_w < k_r) = \text{истина.} \\ P_{k_r l_r m_r} \in \Omega_s, P_{k_w l_w m_w} \in \Omega_s, w = r + 1 \dots n; \\ \sum_{i=1}^n F((P_{klm})_i) = F(n), \text{ где } (P_{klm})_i \in \Omega_{s\delta}. \end{array} \right. \quad (5)$$



Проверяя каждую ветвь графа, можно получить список допустимых вариантов обработки. Однако припуски в этих вариантах обработки располагаются по возрастанию номера ступени отверстия, что не всегда соответствует той последовательности, в которой они должны удаляться. Например, для трёх обрабатываемых ступеней один из ва-

риантов обработки имеет вид $\Omega_4 = \{P_{113}, P_{222}, P_{311}\}$, что недопустимо, т. к. припуск с кодом P_{113} нельзя удалить перед припуском с кодом P_{222} . Кроме этого, один и тот же подвариант может являться базой для нескольких вариантов обработки $\Omega_{s,p}$.

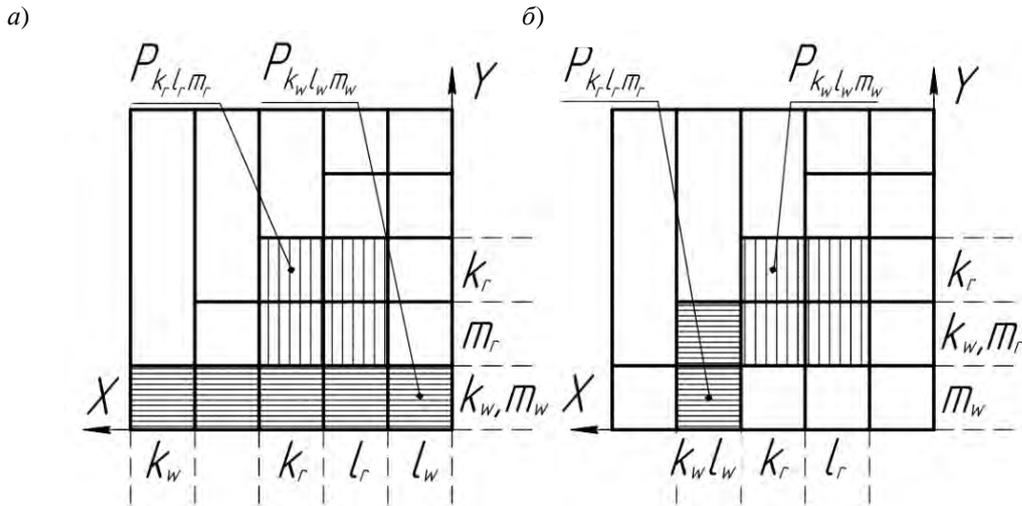


Рис. 7. К определению логической функции при $k_r > k_w$: а – припуск $P_{k_w l_w m_w}$ лежит ниже $P_{k_r l_r m_r}$; б – припуск $P_{k_w l_w m_w}$ лежит левее $P_{k_r l_r m_r}$

Таким образом, для трёх обрабатываемых ступеней вариант обработки Ω_3 может иметь два подварианта обработки: $\Omega_{3,1} = \{P_{222}, P_{311}, P_{113}\}$ и

$\Omega_{3,2} = \{P_{222}, P_{113}, P_{311}\}$ (рис. 8). Поэтому после определения общего числа и структуры вариантов необходимо установить последовательность удаления припусков в каждом варианте.

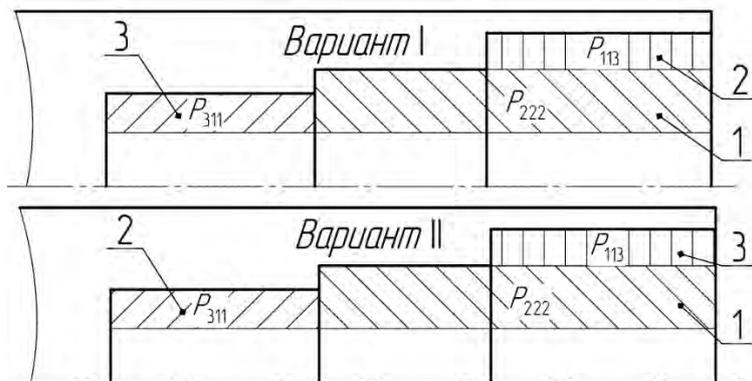


Рис. 8. Определение последовательности удаления припуска

Сначала нужно определить припуск, который будет удалён первым. Первым в данной последовательности обработки удаляется тот припуск, у которого l имеет минимальное значение ($l = 1$), а m – максимальное значение ($m = n$), где l – номер крайней правой ступени, объединённой с k -й ступенью по длине, m – номер ступени большего диаметра из ступеней, объединённых припуском по длине, $m = k, k + 1, \dots, n$. Для варианта обработки Ω_3 результат выполнения этой операции выглядит следующим образом: $\Omega_3 = \{P_{222}, P_{311}, P_{113}\}$.

Из оставшихся $n - 1$ припусков данного варианта обработки образуется вектор обозначений (кодов) припусков. Из элементов полученного вектора последовательными перестановками строятся разные подварианты обработки $\Omega_{s,p}$. После всех пере-

становок из варианта обработки Ω_3 получаем два подварианта обработки: $\Omega_{3,1} = \{P_{222}, P_{311}, P_{113}\}$ и $\Omega_{3,2} = \{P_{222}, P_{113}, P_{311}\}$ (см. рис. 8). Для проверки возможности свободного удаления припусков в том порядке, в котором они представлены множеством $\Omega_{s,p}$, необходимо, чтобы каждый следующий припуск не создавал препятствий для удаления предыдущего.

Если рассматриваемый припуск $P_{k_r l_r m_r} \in \Omega_{s,p}$ лежит ниже (рис. 9, а), чем следующий за ним припуск $P_{k_w l_w m_w} \in \Omega_{s,p}$ ($k_r < k_w$), то для свободного удаления рассматриваемого припуска необходимо, чтобы выполнялось условие $m_w < k_r$, а если выше ($k_r > k_w$) (рис. 9, б) – $l_w > k_r$. В общем виде условие свободного удаления припуска имеет вид:

$$(k_r > k_w) \vee ((m_r < k_w) \wedge (l_w > k_r)) = \text{ИСТИНА},$$

$$\text{при } P_{k_r l_r m_r} \in \Omega_{s,p}, P_{k_w l_w m_w} \in \Omega_{s,p}, r = 1 \dots n, w = r + 1 \dots n. \quad (6)$$

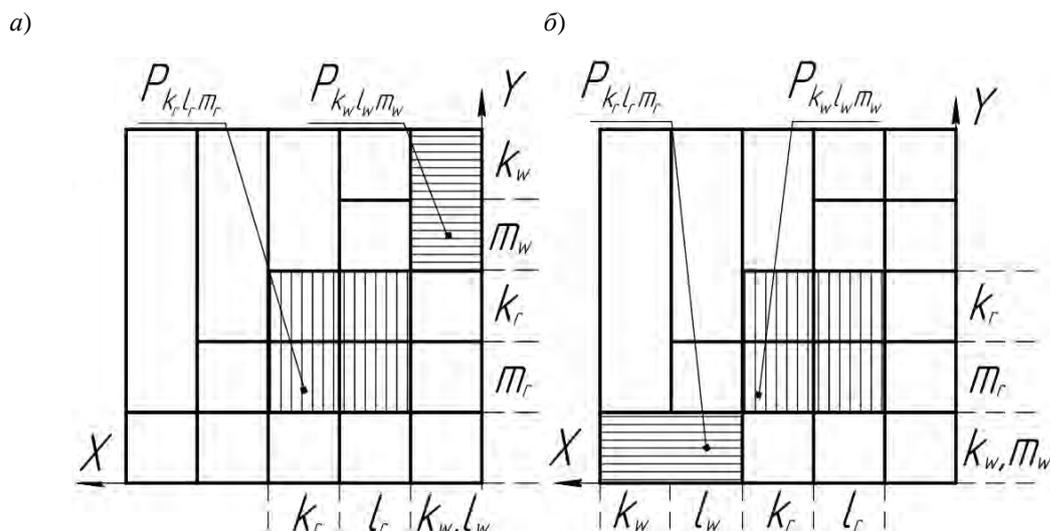


Рис. 9. К определению условия свободного удаления припуска: а – припуск $P_{k_w l_w m_w}$ лежит выше $P_{k_r l_r m_r}$; б – припуск $P_{k_w l_w m_w}$ лежит ниже $P_{k_r l_r m_r}$



Если одно из перечисленных условий не выполняется, то вариант обработки имеет неправильную структуру и не учитывается в дальнейших расчётах.

Функция определения допустимых вариантов обработки (5) и условие свободного удаления припуска (6) определяют теоретические основы структурной оптимизации, которые позволяют выявить допустимые варианты обработ-

ки для любого числа ступеней n .

Согласно полученным теоретическим результатам для трёх обрабатываемых ступеней, из тридцати шести вариантов обработки остаются только шесть допустимых (рис. 10). Разработанная методика позволила получить число вариантов обработки и структуру припусков в зависимости от числа обрабатываемых ступеней.

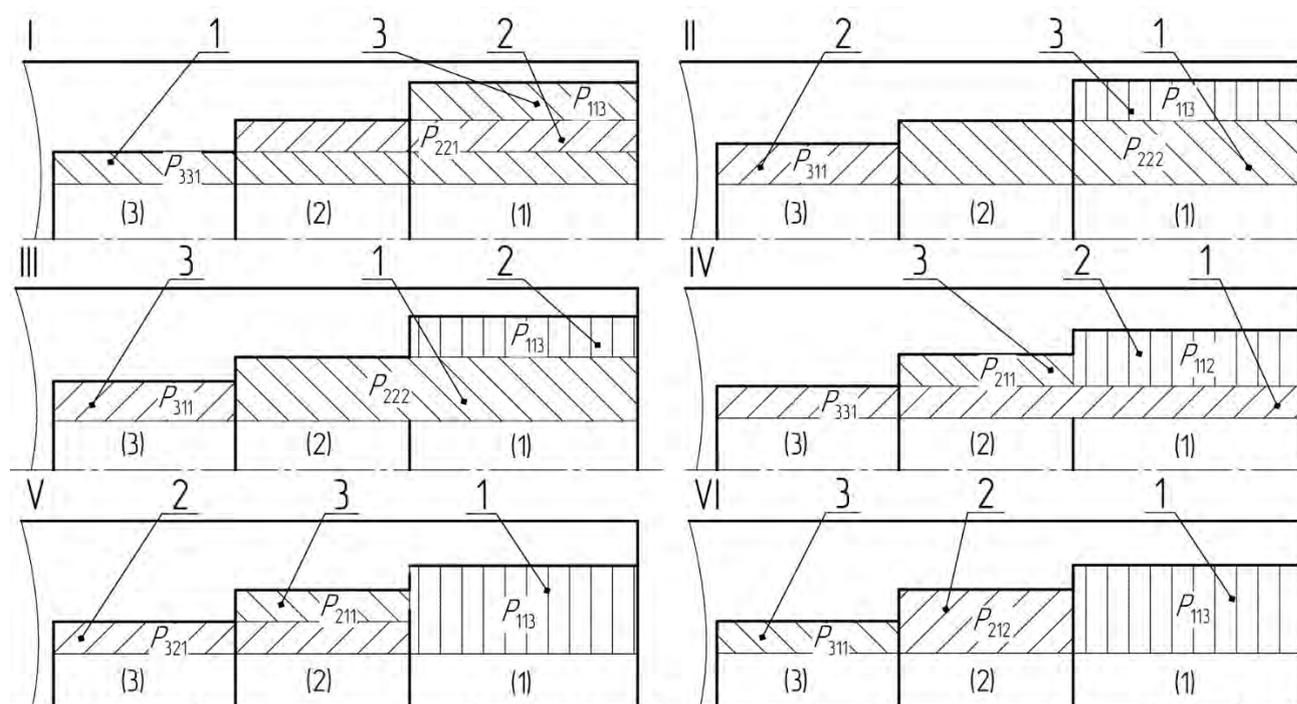


Рис. 10. Варианты обработки для трех ступеней отверстия

Оптимальной будет та последовательность технологических переходов, которая обеспечивает наименьшее оперативное время $T_{оп}$:

$$T_{оп} = \sum_{p=1}^I (T_{ор} + T_{вр}), \quad (7)$$

где $T_{ор}$ – основное время p -го элементарного перехода; $T_{вр}$ – вспомогательное время, связанное с p -м элементарным переходом; I – общее число элементарных переходов.

Основное время p -го перехода

определяется по формуле

$$T_{ор} = \left(\frac{L_p}{S \cdot n} + \frac{L_p}{V_{xx}} \right), \quad (8)$$

где n – частота вращения шпинделя, мин⁻¹; S – продольная подача, мм/об; V_{xx} – скорость перемещения суппорта при выполнении холостого хода, мм/мин.

Общее число переходов определяется как сумма элементарных переходов, необходимых для удаления каждого припуска, число элементарных пере-

ходов припуска – как частное высоты припуска и глубины резания (рис. 11).

Таким образом, для нахождения оптимального варианта необходимо определить оперативное время технологической операции для каждой из воз-

можных комбинаций.

При растачивании отверстий, имеющих небольшую длину и значимые диаметры, целесообразно использовать поперечные ходы режущего инструмента (рис. 12).

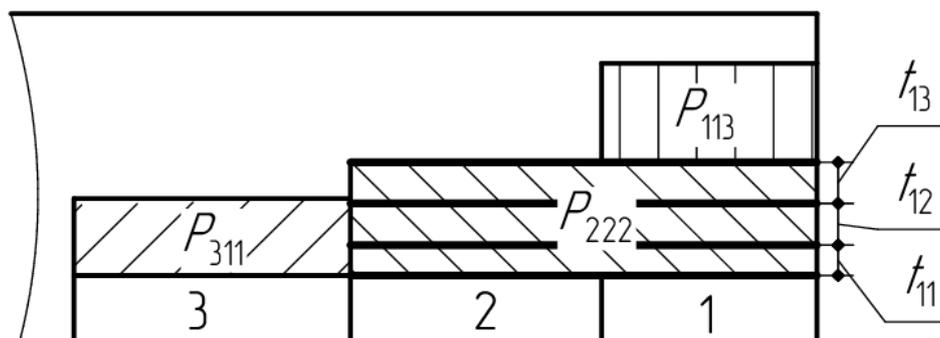


Рис. 11. Разделение припуска ступеней на элементарные переходы

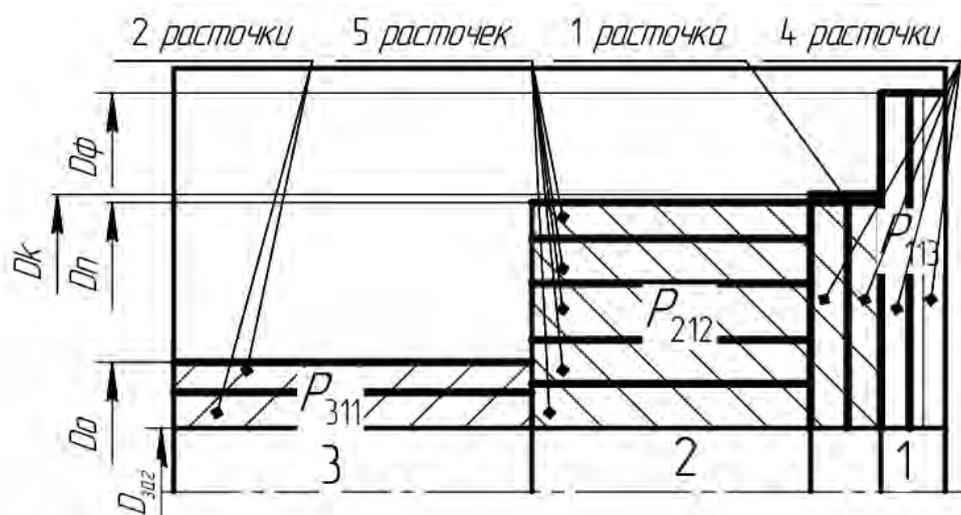


Рис. 12. Вариант обработки с использованием поперечных ходов

На основе разработанной методики было произведено моделирование производительности для всех возможных вариантов обработки трёх ступеней отверстия при следующих условиях: материал режущей части инструмента – Т15К6; параметры заготовок образцов – длина обработки $L = 120$ мм, диаметр – $D_{заг} = 30$ мм; $D_1 = 80$ мм; $D_2 = 60$ мм;

$D_3 = 40$ мм; материал детали – сталь 45; шероховатость Ra для всех ступеней 2,5 мкм. Результаты моделирования представлены в виде гистограммы (рис. 13), где показано время обработки в зависимости от варианта снятия припуска (см. рис. 10) и сравнивается производительность обработки с применением поперечных ходов и с использова-

нием только продольных ходов. Доказана рациональность применения поперечных ходов режущего инструмента. Использование разработанной структурной оптимизации позволяет повы-

сить производительность механической обработки трехступенчатого отверстия на 5...15 % за счет уменьшения основного времени.

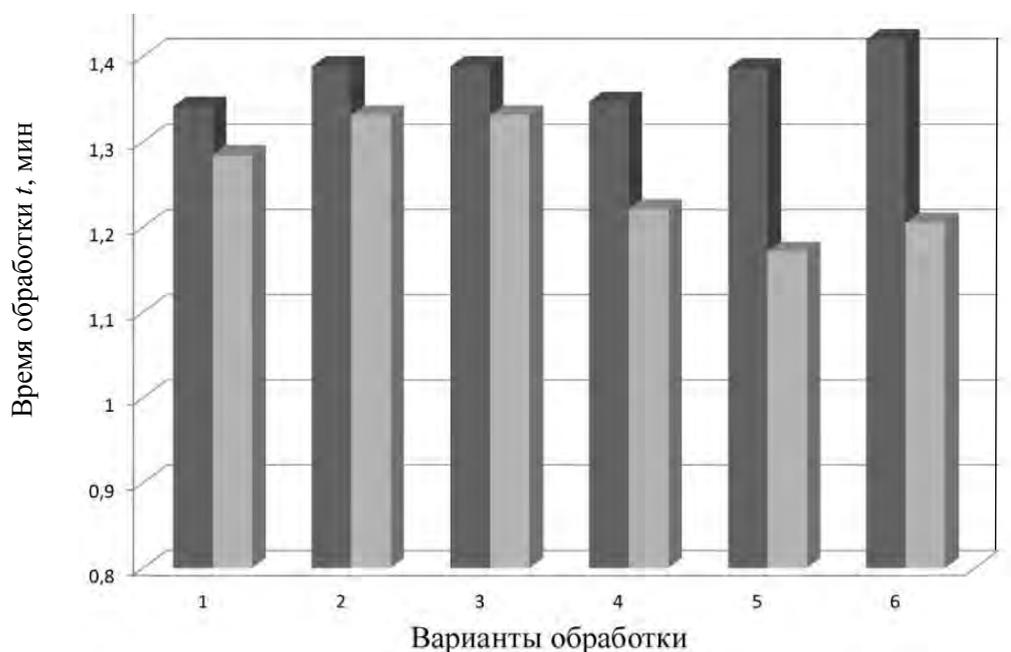


Рис. 14. Производительность вариантов обработки: ■ – только продольные ходы; ■ – продольные и поперечные ходы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Казаков, А. В.** Теоретическое обоснование и технологическое обеспечение точности токарной обработки ступенчатых валов на основе структурно-параметрической оптимизации : дис. ... канд. техн. наук / А. В. Казаков. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 226 л.
2. Технологическое обеспечение качества ступенчатых валов и шлицевых соединений : монография / А. А. Жолобов, К. А. Шалыжин, А. В. Казаков, Е. Ю. Демиденко ; под ред. А. А. Жолобова. – Могилев-Смоленск : Принт-экспресс, 2014. – 204 с.

Статья сдана в редакцию 4 мая 2017 года

Александр Алексеевич Жолобов, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-523-954.

Алексей Владимирович Казаков, инженер-программист PLM-решений, г. Минск. Тел.: +375-299-996-184.

Денис Валерьевич Боярко, магистрант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-445-754-387.

Alexander Alexeyevich Zholobov, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-029-652-39-54.

Alexey Vladimirovich Kazakov, PhD (Engineering), PLM Software Engineer, Minsk. Phone: +375-029-999-61-84.

Denis Valeryevich Boyarko, MSc student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-044-575-43-87.