

УДК 621.9

**А. А. Жолобов, канд. техн. наук, проф., А. М. Федоренко, канд. техн. наук,  
А. В. Казаков**

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВАРИАНТОВ ОБРАБОТКИ СТУПЕНЧАТОГО ВАЛА В ЗАДАЧЕ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрены вопросы определения вариантов обработки ступенчатого вала. Использован подход, базирующийся на формировании вариантов обработки из элементарных припусков. Рассмотрена возможность применения методики определения вариантов обработки в САПР ТП для решения задачи структурной оптимизации.

В настоящее время существует довольно большое количество интегрированных CAD/CAM-систем (КОМПАС, T-FLEX, SIMATRON и др.), в которых геометрическая информация из рабочего чертежа детали используется для автоматизированного программирования обработки на станках с ЧПУ. В то же время практически отсутствуют системы, в которых информация из рабочего чертежа детали использовалась бы для автоматизации процесса структурной оптимизации технологических операций. Это обусловлено тем, что в CAD-системах формируется геометрическая информация, которую весьма сложно интерпретировать в вид, пригодный для автоматизации проектирования технологии. Учитывая, что большинство существующих CAD-систем имеют интегрированные системы программирования, например, Visual LISP, Visual Basic Application или интерфейс с системами программирования C++, Delphi, задача автоматизации процесса структурной оптимизации может быть решена путем разработки объектно-ориентированных подсистем проектирования.

Задача определения оптимальной последовательности выполнения технологических переходов возникает обычно в условиях единичного и серийного производств, для которых характерно построение операций с многочисленными вариантами последовательности механической обработки поверхностей. При многовариантности последовательности выполнения переходов оптимизация процесса удале-

ния припуска позволяет уменьшить время обработки на 15–30 и более процентов [1].

В дальнейшем рассматривается постановка и решение на ЭВМ задачи определения вариантов обработки поверхностей применительно к предварительному точению шеек валов на токарных станках с ЧПУ. Для решения этой задачи припуск представляется в виде совокупности элементарных частей  $Z_{ij}$ , ограниченных образующими ступеней вала и их торцами. На рис. 1 показано разделение общего припуска трехступенчатого вала, изготавливаемого из проката, на элементарные части.

Припуск, удаляемый на каждом из технологических переходов, условно можно представить состоящим из одной или нескольких таких элементарных частей. Все возможные варианты припусков, образуемые при обработке  $k$ -й ступени, могут быть заданы уравнением [1]

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

где  $k$  – номер ступени,  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – число ступеней обрабатываемой части вала;  $l$  – номер крайней правой ступени, объединенной с  $k$ -м припуском по длине,  $l = 1, 2, \dots, k$ ;  $m$  – номер ступени большего диаметра из ступеней, объединенных припуском по длине,  $m = k, k + 1, \dots, n$ .

Для трёх обрабатываемых ступеней вала припуски 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 -

- $P_{212} = \{Z_{12}; Z_{22}\}; P_{213} = \{Z_{12}; Z_{13}; Z_{22}; Z_{23}\}; P_{222} = \{Z_{22}\}; P_{223} = \{Z_{22}; Z_{23}\};$
- припуски третьей ступени -  
 $P_{313} = \{Z_{13}; Z_{23}; Z_{33}\}; P_{323} = \{Z_{23}; Z_{33}\}; P_{333} = \{Z_{33}\}.$

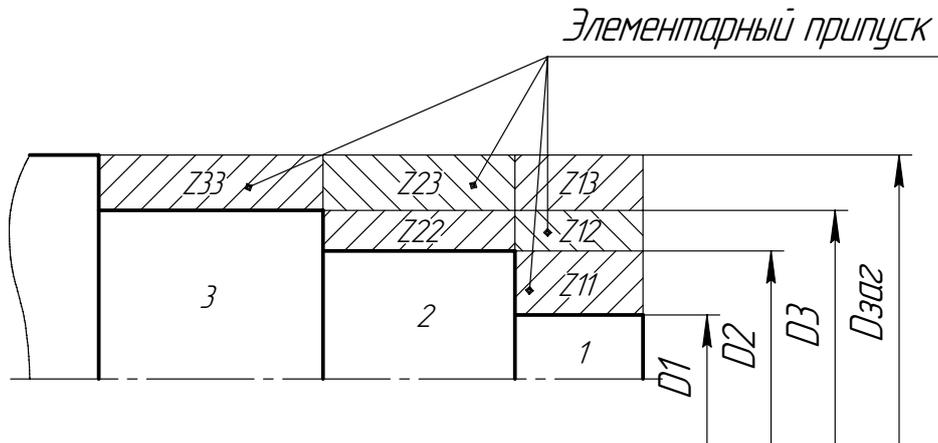


Рис. 1. Схема расчленения общего припуска трёхступенчатого вала, изготавливаемого из проката, на элементарные припуски

Уравнение (1) определяет совокупности припусков, которые может образовывать каждая обрабатываемая ступень вала, но не описывает, как они могут быть объединены в определённые варианты обработки. Исходя из вышесказанного результатов можно определить общее число вариантов обработки для трёх ступеней. Если первая ступень образует три припуска, вторая – четыре и третья – три, то общее число вариантов равно произведению количества припусков, которое может образовывать каждая обрабатываемая ступень, т. е.  $3 \cdot 4 \cdot 3 = 36$ . Очевидно то, что элементарная часть  $Z_{ij}$  не может одновременно входить в состав двух и более припусков различных ступеней вала одного варианта обработки (например, вариант обработки, состоящий из следующих припусков:  $P_{313} = \{Z_{13}; Z_{23}; Z_{33}\}; P_{113} = \{Z_{11}; Z_{12}; Z_{13}\}; P_{222} = \{Z_{22}\}$ ). Из сказанного возникает задача определения всех допустимых вариантов обработки. Решение данной задачи на ЭВМ состоит из двух этапов:

- построение графа, вершинами ко-

торого являются припуски ступеней обрабатываемой части вала;

- проверка возможности каждой ветки графа образовывать полноценный вариант обработки.

Перед решением поставленных выше задач необходимо определить представление припуска ступени на ЭВМ. Его удобно представить в виде структуры (записи), которая включает следующие поля:  $k$ ,  $l$ ,  $m$  – характеризующие код припуска;  $d_{min}$  – минимальный диаметр припуска;  $d_{max}$  – максимальный диаметр припуска;  $h_p$  – высота припуска;  $l_p$  – длина припуска;  $l_0$  – длина обработанной части припуска;  $d_0$  – диаметр обработанной части припуска;  $l_v$  – промежуточная длина обработки;  $d_v$  – промежуточный диаметр обработки;  $z_0$  – начальная координата припуска;  $z_{max}$  – конечная координата припуска.

Для решения первой задачи используется невыровненный массив, размерность  $k$ -й строки которого определяется зависимостью  $[k, k \cdot (n + 1 - k)]$ , где

$n$  – число ступеней обрабатываемой части вала. Структура массива формируется из припусков обрабатываемых ступеней, причём в первую строку помещаются припуски первой ступени, во вторую – припуски второй ступени и т. д.

Для решения второй задачи определения полноценных вариантов обработки удобно обрабатываемую часть вала представить в виде матрицы единичных элементов размерностью  $n \times n$  ( $n$  – число ступеней обрабатываемой части вала), где

выше главной диагонали лежат элементы, представляющие собой элементарные припуски  $Z_{ij}$  (рис. 2). Например, элемент матрицы  $X = 2, Y = 3$  соответствует элементарному припуску  $Z_{23}$ .

Припуск  $k$ -й ступени  $P_{klm}$  будет представлять собой прямоугольник, состоящий из элементов матрицы (рис. 3), нижний левый угол которого имеет координаты  $X = k, Y = k$ , а верхний правый –  $X = l, Y = m$ .

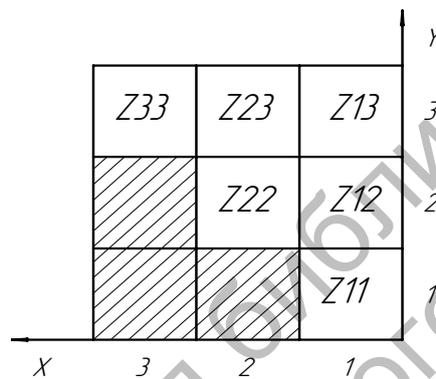


Рис. 2. Матрица единичных элементов

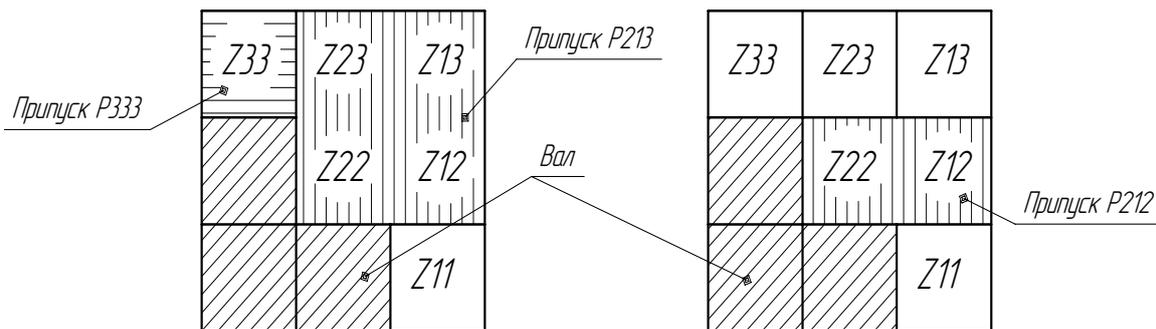


Рис. 3. Представление припусков ступеней в виде элементов матрицы

Так как каждый элементарный припуск занимает в матрице единичных элементов одну позицию, то и его площадь в диаметральной сечении вала в этой матрице равна единице и не зависима от размеров ступеней вала. Площадь припуска

ступени в матрице единичных элементов равна количеству элементарных припусков, входящих в данный припуск. Например, площадь  $P_{213} = 4$ , а площадь  $P_{323} = 2$ . Формула для определения площади припуска имеет вид:

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

Площадь варианта комбинации припусков ступеней обрабатываемой части вала  $S_{общ}$  должна быть равна количеству элементарных припусков:

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

или

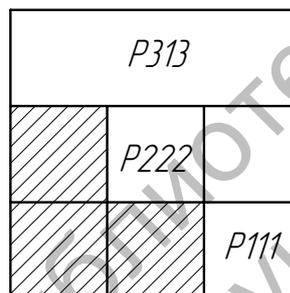
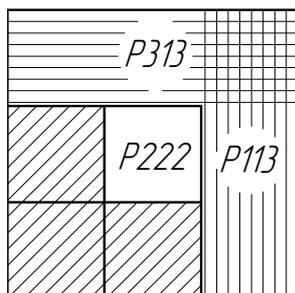


Рис. 4. Примеры неполноценных вариантов обработки

Для полного перебора вариантов структуры из конечного множества необходимо задавать перечень всех элементов этого множества. Такой перечень создается в виде массива структуры варианта обработки. Тогда для данного варианта обработки устанавливается общая последовательность удаления припусков. Необходимым условием включения припуска ступени в общий вариант обработки является исключение области пересечения элементарных частей данного припуска с элементарными частями припусков, входящих в рассматриваемый вариант обработки.

Каждой паре припусков варианта обработки соответствует логическая функция. 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 выбора должна подчиняться нижеследующим условиям.

Два припуска  $P_{k_1 l_1 m_1}$  и  $P_{k_2 l_2 m_2}$  не будут иметь общих элементарных частей  $Z_{ij}$  при выполнении определенных условий, т. е. каждый припуск должен лежать выше или (и) левее или ниже или (и) правее по отношению к рассматриваемому. Если сравниваемые припуски являются соседними, т. е.  $k_1 - k_2 = 1$ , то необходимо, чтобы выполнялось одно из нижеперечисленных условий:  $(m_2 < k_1)$  и  $(l_1 \leq l_2)$  или  $(k_2 < l_1)$  и  $(m_1 \leq m_2)$ . Если  $k_1 - k_2 > 1$ , то необходимым условием является  $(k_1 > m_2)$  или  $(l_1 > k_2)$ .

Проверяя каждую ветку графа на пересечение припусков и несоответствие суммы площадей припусков ветки общей площади, можно получить список полноценных вариантов обработки. Однако припуски в этих последовательностях располагаются по возрастанию номера ступени вала, что не всегда

соответствует той последовательности, в которой они должны удаляться. Например, для трёх обрабатываемых ступеней одна из полученных последовательностей припусков имеет вид:  $P_{111}; P_{213}; P_{333}$ , что недопустимо, т. к. припуск с кодом 111 нельзя удалить перед припуском с кодом 213 (рис. 5). Кроме этого одна и та же по-

следовательность припусков может образовывать несколько вариантов обработки. Так, для трёх обрабатываемых ступеней последовательность припусков  $P_{111}; P_{213}; P_{333}$  может образовывать два варианта обработки:  $P_{213}; P_{111}; P_{333}$  и  $P_{213}; P_{333}; P_{111}$  (рис. 5).

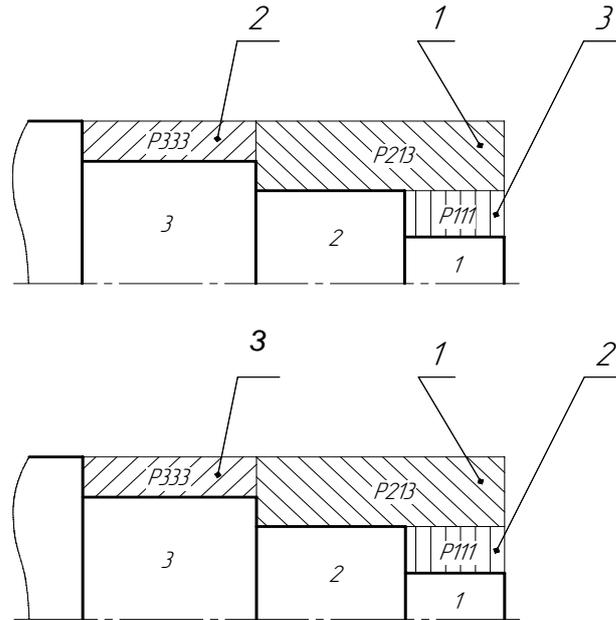


Рис. 5. Определение последовательности удаления припусков

Поэтому после определения общего числа вариантов необходимо определить последовательность удаления припусков в каждом варианте. Сначала нужно определить припуск, который будет удалён первым, и затем переместить его в начало варианта обработки. Первым в данной последовательности обработки удаляется тот припуск, у которого  $l$  имеет минимальное значение, а  $m$  – максимальное значение. Для последовательности  $P_{111}; P_{213}; P_{333}$  результат выполнения этой операции выглядит следующим образом:  $P_{213}; P_{111}; P_{333}$ . Из оставшихся  $n - 1$  припусков данного варианта обработки образуется массив  $P[n - 1]$ , из которого строятся последовательные перестановки, где каждая следующая образуется из предыдущей с помощью однократной транспозиции соседних элементов.

Обозначим через  $PR[i]$  булеву переменную, содержащую информацию о том, переносится ли припуск  $i$  вперед ( $PR[i] = \text{true}$ ) или назад. Переменная  $C[i]$  будет показывать, какую из возможных  $n - i$  позиций припуск  $i$  занимает относительно элементов  $i + 1, \dots, n$  на своем пути вперед и назад. После всех перестановок из последовательности  $P_{213}; P_{111}; P_{333}$  получаем два варианта обработки:  $P_{213}; P_{111}; P_{333}$  и  $P_{213}; P_{333}; P_{111}$ . Для проверки возможности свободного удаления припусков в том порядке, в котором они представлены, необходимо, чтобы каждый следующий припуск не создавал препятствий для удаления предыдущего. Если рассматриваемый припуск  $P_{k_1 l_1 m_1}$  лежит выше, чем предыдущий припуск

$P_{k_2 l_2 m_2}$ , то для свободного удаления рассматриваемого припуска необходимо, чтобы выполнялось условие  $k_1 > k_2$ , иначе должно выполняться условие  $m_1 < k_2$ . Если ни одно из перечисленных условий не выполняется, то вариант обработки имеет неправильную структуру и не учитывается в дальнейших расчётах.

Таким образом, при обработке трёхступенчатого вала таких вариантов 36 (рис. 6), но с учетом того, что каждая из элементарных частей припуска  $Z_{ij}$  может входить в данную комбинацию  $P_{klm}$  (припуск  $k$ -й ступени) только один раз, получаем шесть сочетаний  $Z_{ij}$ , соответствующих шести вариантам обработки (рис. 5 и 7).

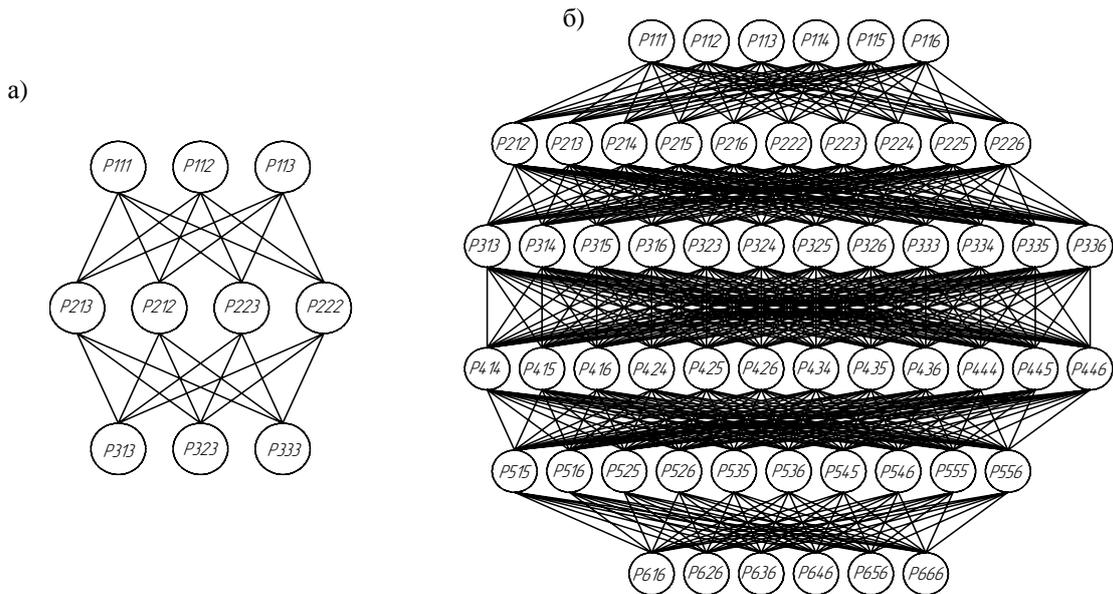


Рис. 6. Все возможные сочетания припусков: трёх ступеней вала (а); шести ступеней вала (б)

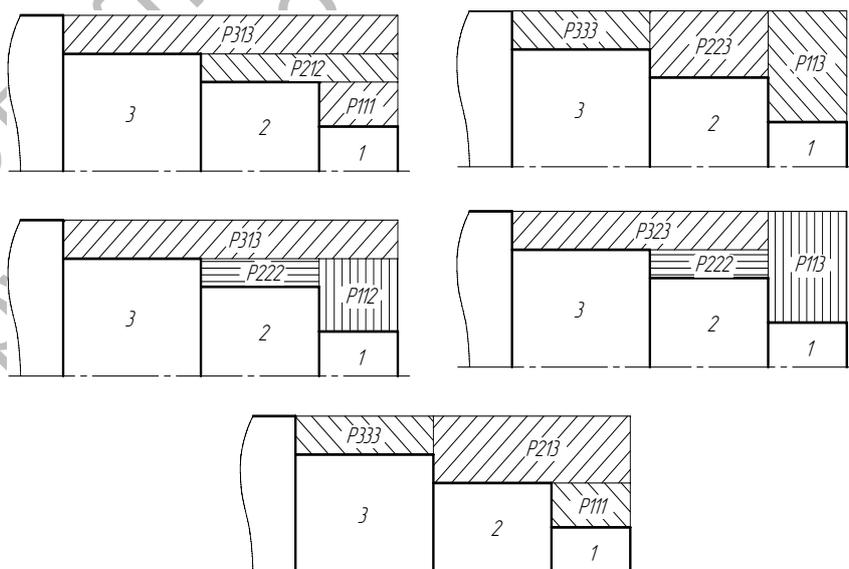


Рис. 7. Образование припусков ступеней из элементарных припусков

Разработанная методика позволила получить число вариантов обработки и структуру припусков в зависимости от числа обрабатываемых ступеней (табл. 1).

Табл. 1. Число вариантов комбинаций припусков обрабатываемых ступеней

Число ступеней, обрабатываемых на данном установе	Число вариантов	
	общее	допустимых (полноценных)
9	$9 \cdot 16 \cdot 21 \cdot 24 \cdot 25 \cdot 24 \cdot 21 \cdot 16 \cdot 9 = 131\ 681\ 894\ 400$	362880
8	$8 \cdot 14 \cdot 18 \cdot 20 \cdot 20 \cdot 18 \cdot 14 \cdot 8 = 1\ 625\ 702\ 400$	40320
7	$7 \cdot 12 \cdot 15 \cdot 16 \cdot 15 \cdot 12 \cdot 7 = 25\ 401\ 600$	5040
6	$6 \cdot 10 \cdot 12 \cdot 12 \cdot 10 \cdot 6 = 512\ 400$	720
5	$5 \cdot 8 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 5 = 14\ 400$	120
4	$4 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 4 = 576$	24
3	$3 \cdot 4 \cdot 3 = 36$	6
2	$2 \cdot 2 = 4$	2

Оптимальной будет та последовательность технологических переходов, которая обеспечивает наименьшее оперативное время  $T_{оп}$  [1]:

$$T_{оп} = \sum_{p=1}^I (T_{оп} + T_{вр}), \quad (3)$$

где  $T_{оп}$  – основное время  $p$ -го элементарного перехода;  $T_{вр}$  – вспомогательное вре-

мя, связанное с  $p$ -ым элементарным переходом;  $I$  – общее число элементарных переходов.

Общее число элементарных переходов определяется как сумма элементарных переходов необходимых для удаления каждого припуска. Число элементарных переходов припуска определяется как частное высоты припуска и глубины резания (рис. 8).

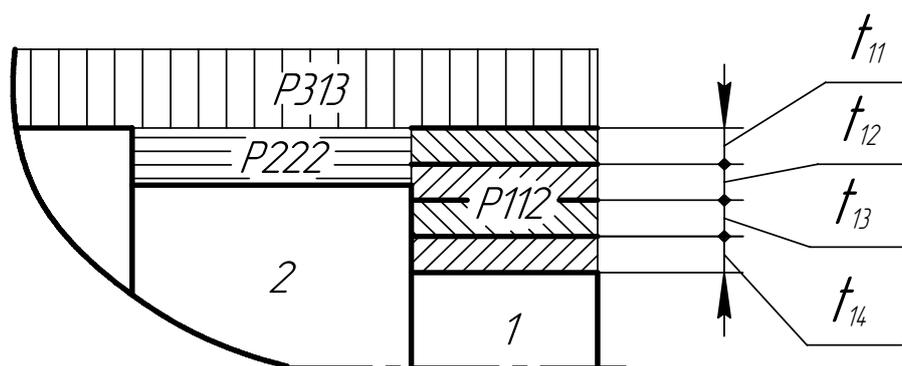


Рис. 8. Разделение припуска ступени на элементарные переходы

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

бинаций.

На основе данной методики разработана система генерации управляющей программы для станков с ЧПУ. В каче-

стве исходных данных используется текстовый файл с описанием цилиндрических поверхностей ступенчатого вала. При анализе данного файла генерируются варианты обработки и определяется вариант обработки с минимальным временем. Интерфейс системы, использующей данную методику, представленный на рис. 8, реализует диалог пользователя с системой как на стадии ввода информации, так и при получении готового решения поставленной за-

дачи. Ввод параметров осуществляется с помощью диалоговых окон, представленных на рис. 9.

Разработанная методика позволяет решать задачи, связанные со структурной оптимизацией технологических переходов, и может применяться в различных САПР ТП.

Результат работы системы представлен на рис. 10.

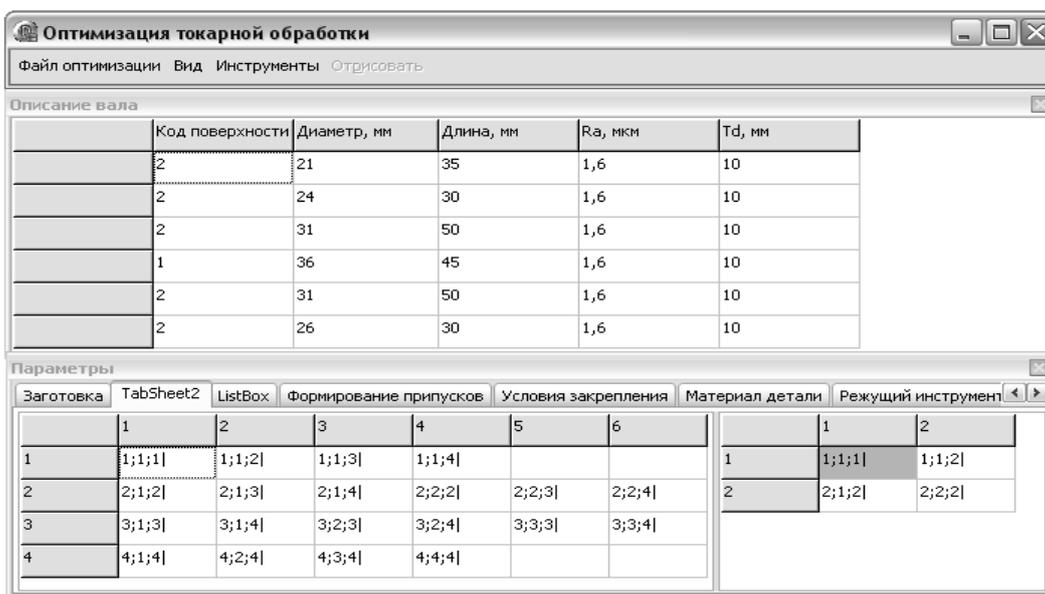


Рис. 8. Интерфейс системы

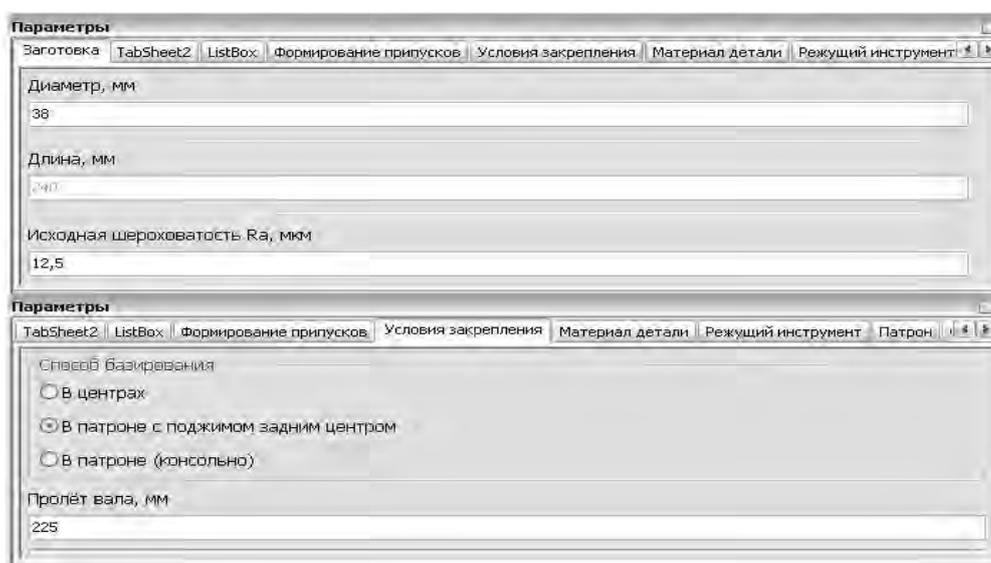


Рис. 9. Окно ввода параметров

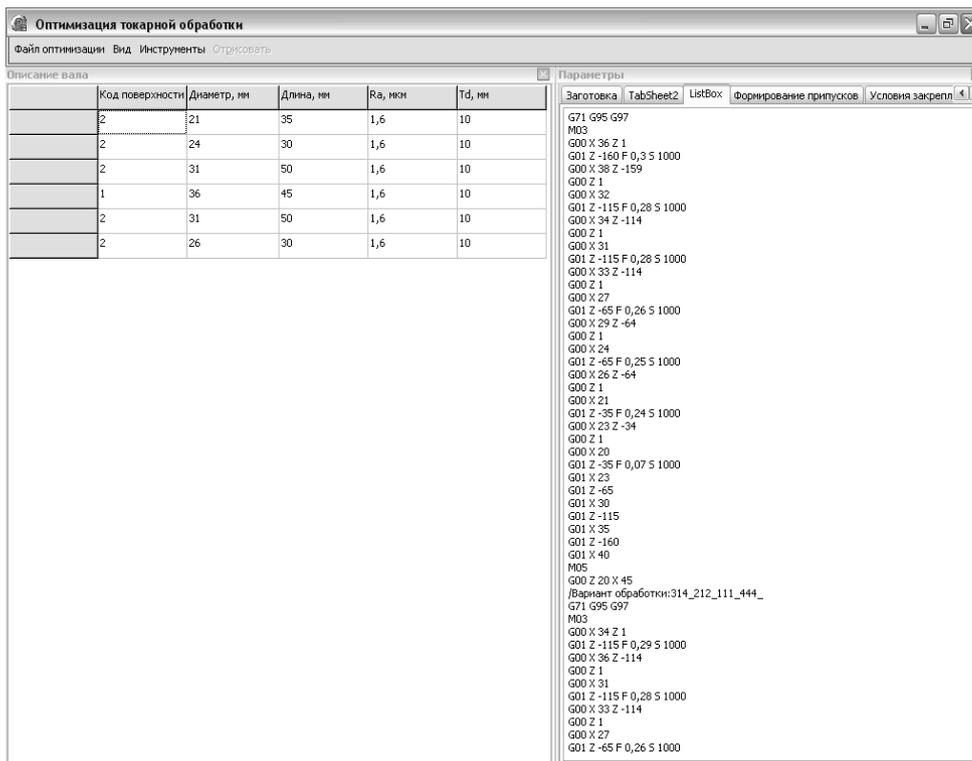


Рис. 10. Результат работы системы

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология автоматизированного производства (специальная часть) : учеб. пособие

для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Жолобов [и др.] ; под ред. А. А. Жолобова. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 384 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 03.04.2008

**A. A. Golobov, A. M. Fedorenko, A. V. Kazakov**  
**Evaluation technique of stepped shaft machining variants for structural optimization**

The problem of evaluating of stepped shaft machining variants is considered in the paper. The approach based on the formation of machining sequence from elementary allowances was used. The possibility of using the evaluation technique in the system of computer-aided design of technological processes for structural optimization is considered.