

Анатолий Николаевич Никулин родился в 1962 г., окончил Грузинский политехнический институт в 1962 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Технология обработки материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 75 научных работ в области обработки металлов давлением.

A.N. Nikulin (b. 1962) graduated from the Georgian Polytechnic Institute in 1962. D. Sc. (Eng.), assoc. professor of “Metal Forming” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 75 publications in the field of metal forming.

УДК 621.9.025;621.9.06

В. С. И в а н о в, Д. В. И в а н о в

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЩЕЛЕВЫХ СТРУКТУР ВРАЩАЮЩИМСЯ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

*Решена кинематическая задача взаимодействия режущего инструмента и заготовки при циклоидальном формообразовании, применяемом для изготовления щелевых поверхностей, например фильтрующих труб.*

При разработке технологий получения щелевых поверхностей, используемых, например, для производства фильтрующих труб, одним из основных параметров, требующих аналитической оценки, является длина щели  $l$  (рис. 1).

Задачей настоящей работы является построение математической модели процесса циклоидального формообразования щели и ее анализ.

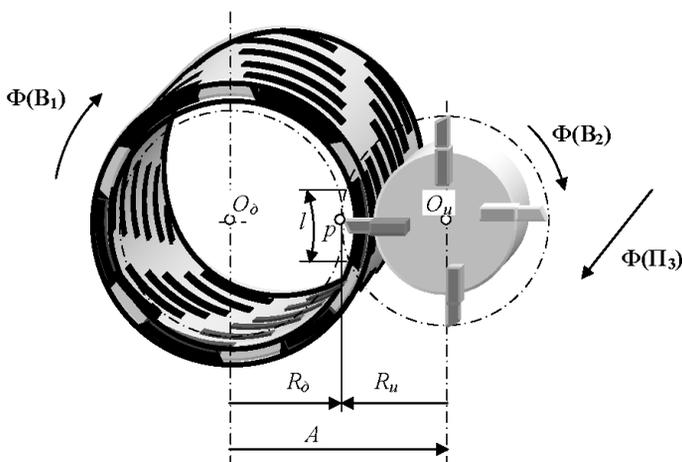


Рис. 1. Схема многолезвийной обработки в режиме встречного резания

**Приведенные геометрические и кинематические параметры процесса формообразования**

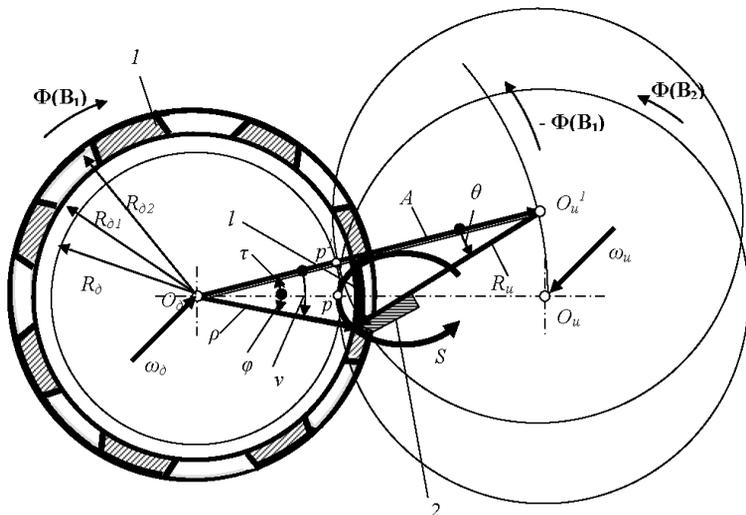
Обозначение приведенного параметра и формулы для его определения	Наименование приведенного параметра
$i_1 \equiv i_1 \check{R}_и = R_и / R_д$	Геометрическое передаточное отношение схемы технологического зацепления, тождественно равное приведенному радиусу инструмента
$\check{A} = A / R_д = 1 - i_1$	Приведенное межцентровое расстояние
$i = \omega_д / \omega_и$	Кинематическое передаточное отношение угловых скоростей детали и инструмента
$I = \frac{V_и}{V_д} = \frac{i_1}{i}$	Передаточное отношение окружных скоростей
$\check{\rho} = \rho / R_д$	Приведенный радиус формообразования, определяемый отношением текущего радиуса формообразования к номинальному радиусу детали

Рассмотрим абсолютное движение формообразующей точки в координатах, связанных с деталью. Для сопоставимости расчетных данных при моделировании и исследовании, геометрические параметры формообразования рассматриваются в виде, приведенном к единичному радиусу детали, а кинематические — к угловой скорости инструмента (табл. 1).

Для решения задачи синтеза, заключающейся в определении межцентрового расстояния  $A$ , обеспечивающего требуемую длину  $l$  прорези (рис. 2), модель, связывающую геометрические параметры схемы технологического зацепления  $A$ ,  $\rho$ ,  $R_и$ , центральный угол  $\varphi$  прорези, пропорциональный ее длине  $l$ , и кинематический параметр формообразующих движений  $i$ , в аналитическом виде можно представить уравнениями с использованием следующих зависимостей:

$$\begin{cases} A = -R_и + \sqrt{\rho^2 - (R_и \sin \theta)^2}; \\ \theta = \arcsin \frac{\rho \sin(\varphi + i\theta)}{R_и}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $A$  — межцентровое расстояние;  $\rho = R_д1$  — текущий радиус формообразования, например равный радиусу внутренней поверхности трубчатой заготовки, по которой задана длина прорези;  $\varphi = \frac{l}{2\rho}$  — половина центрального угла прорези;  $l$  — длина прорези;  $R_и$  — координата радиуса-вектора инструмента; для внешней схемы зацепления  $R_и < 0$ ;  $\theta$  — текущий угол контакта инструмента с деталью.



**Рис. 2. Схема многолезвийной обработки в режиме встречного резания:**  
 1 – деталь; 2 – инструмент;  $S$  – траектория формообразования;  $l$  – длина прорези;  
 $\rho$  – радиус формообразования

Для решения предлагается итерационный алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 3.

Модель базируется на векторном представлении схемы технологического зацепления и формообразующих движений [1].

Для решения второго уравнения системы (1) приведем его к рекуррентному виду относительно переменной  $\theta$ . Его суть заключается в том, что переменной  $\theta$  в правой части уравнения присваивается индекс  $j$  – номер текущей итерации, а в левой – номер последующей итерации ( $j + 1$ ):

$$\theta_{j+1} = \arcsin\left(\frac{\rho}{R_u} \sin(\varphi + i\theta_j)\right). \quad (2)$$

Уравнение (2) решают, используя один из численных методов – метод итераций (последовательных приближений) [2].

Первоначально текущему  $\theta_j$  присваивают его начальное значение  $\theta_j = 0$ .

После вычисления  $\theta_{j+1}$  определяется относительная погрешность вычислений:

$$\Delta = \frac{\theta_{j+1} - \theta_j}{\theta_{j+1}}. \quad (3)$$

Далее проводится сравнение с допустимой погрешностью  $[\Delta]$ ; если  $\Delta > [\Delta]$ , то вычисленному последующему значению  $\theta_{j+1}$  присваивается индекс текущего значения  $\theta_j$  и далее реализуется следующая вычислительная итерация. Итерационные циклы продолжаются до тех пор, пока в логической операции сравнения справедливо указанное ранее неравенство. При отрицательном результате сравнения расчет

Последовательность процедур

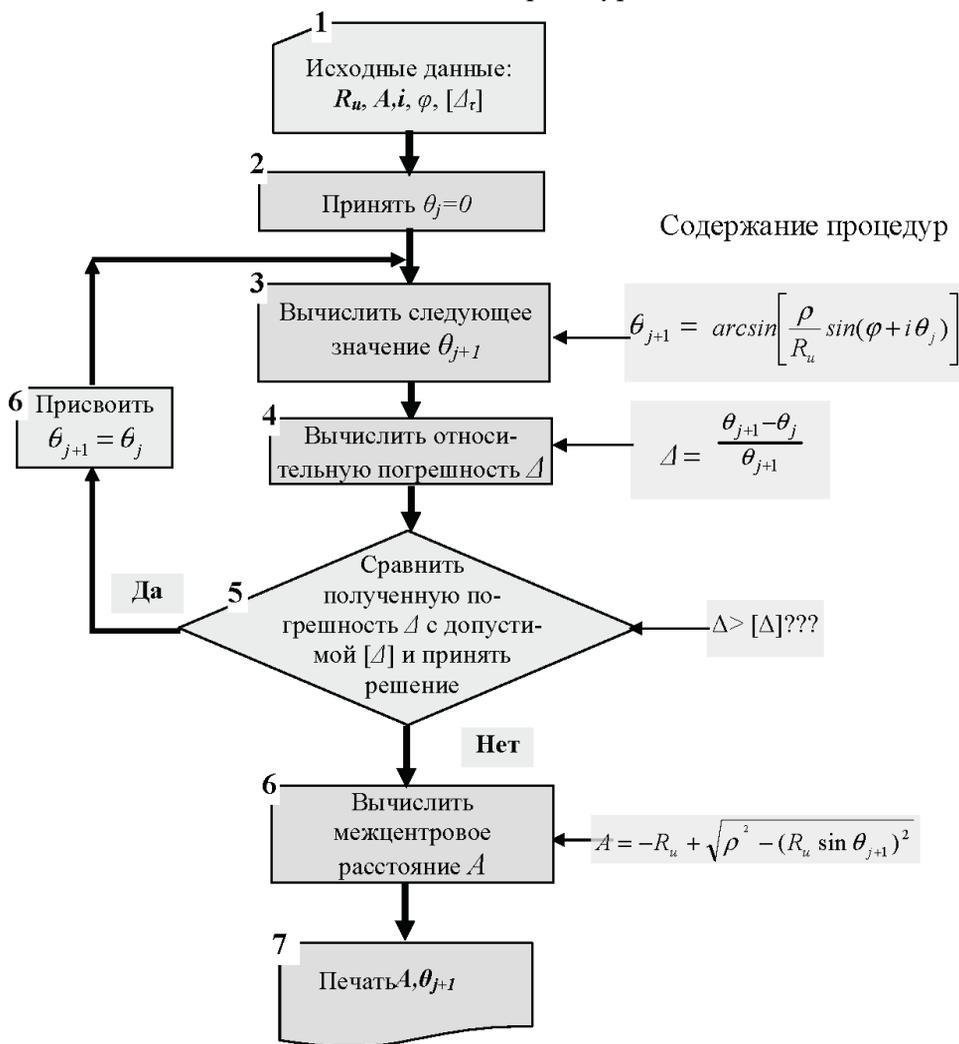


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета параметров формообразования прорези

прекращается и окончательно принимается последний результат вычислений  $\theta_{j+1}$ , который удовлетворяет требуемой точности расчета.

Далее вычисляется параметр  $A$  по первому уравнению модели (1).

Результаты расчета для заданных  $\rho_1 = R_{д1} = 22$  мм (внутренний радиус трубы),  $R_u = -95$  мм (внешняя схема технологического зацепления),  $i = -2$  и  $i = -1$  для диапазона  $l = 2 \dots 20$  и допустимой погрешности вычислений  $[\Delta] = 0,005$  представлены в табл. 2 и 3.

Графическая интерпретация результатов расчета межцентрового расстояния  $A$  от кинематического передаточного отношения  $i$  по предложенному алгоритму для диапазона требуемой длины прорези  $l = 2 \dots 20$  мм представлена на рис. 4.

Таблица 2

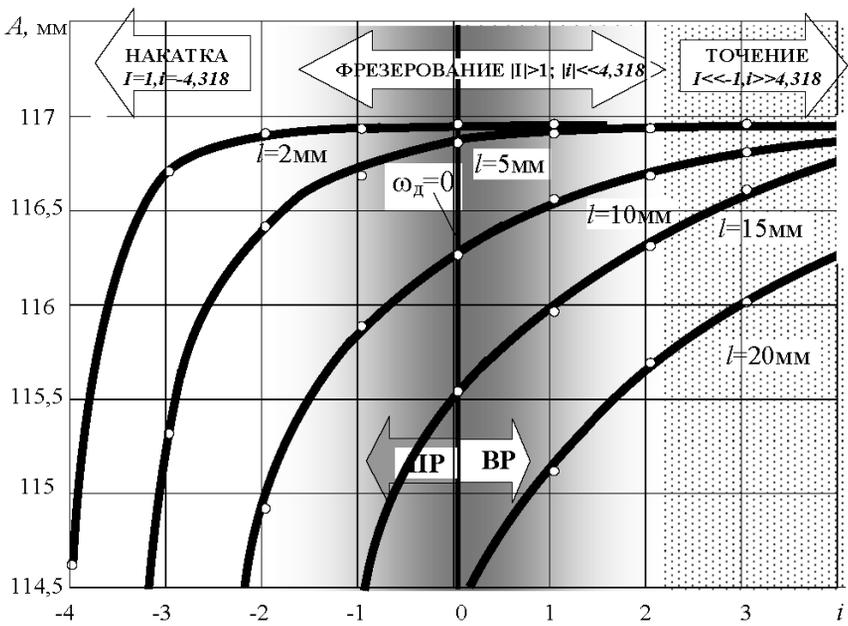
Межцентровое расстояние  $A$ , необходимое для обеспечения требуемой длины прорези  $l$ , и число  $j$  итераций, необходимое для обеспечения допустимой погрешности  $0,005$  для  $i = -2$

$j$	$l, \text{мм}$														
	2			5			10			15			20		
	$\theta_j/\theta_{j+1}$ рад	$\Delta$	$A$ , мм	$\theta_j/\theta_{j+1}$ рад	$\Delta$	$A$ , мм	$\theta_j/\theta_{j+1}$ рад	$\Delta$	$A$ , мм	$\theta_j/\theta_{j+1}$ рад	$\Delta$	$A$ , мм	$\theta_j/\theta_{j+1}$ рад	$\Delta$	$A$ , мм
0	0/ -0,0106	1		0/ -0,0264	1		0/ -0,0522	1		0/ -0,0776	1		0/ -0,102	1	
1	-0,0106/ -0,0152	0,315		-0,0264/ -0,0385	0,315		-0,0522/ -0,0755	0,308		-0,0776/ -0,1105	0,294		-0,102/ -0,142	0,202	
2	-0,0152/ -0,0177	0,129		-0,0385/ -0,0440	0,126		-0,0755/ -0,0856	0,118		-0,1105/ -0,1236	0,106		-0,142/ -0,156	0,091	
3	-0,0177/ -0,0187	0,056		-0,0440/ -0,0465	0,055		-0,0856/ -0,0900	0,048		-0,1236/ -0,1287	0,040		-0,156/ -0,161	0,031	
4	-0,0187/ -0,0191	0,027		-0,0465/ -0,0477	0,025		-0,0900/ -0,0918	0,020		-0,1287/ -0,1307	0,015		-0,161/ -0,163	0,010	
5	-0,0191/ -0,0194	0,015		-0,0477/ -0,0482	0,011		-0,0918/ -0,0926	0,009		-0,1307/ -0,1315	0,006		-0,163/ <b>-0,1633</b>	<b>0,002</b>	
6	-0,0194/ -0,0195	0,007	116,904	-0,0482/ -0,0485	0,0052	116,888	-0,0926/ -0,0929	<b>0,003</b>	114,895	-0,1315/ <b>-0,1318</b>	<b>0,002</b>	107,730			
7	-0,0195/ <b>-0,0196</b>	<b>0,004</b>		-0,0485/ <b>-0,0486</b>	0,002										109,403

Таблица 3

Межцентровое расстояние  $A$ , необходимое для обеспечения требуемой длины прорези  $l$ , и число  $j$  итераций, необходимое для обеспечения допустимой погрешности  $0,005$  для  $i = -1$

$j$	$l, \text{мм}$														
	2			5			10			15			20		
	$\theta_j/\theta_{j+1}$ рад	$\Delta$	$A$ , мм												
0	0/ -0,0106	1		0/ -0,0264	1		0/ -0,0522	1		0/ -0,0776	1		0/ -0,102	1	
1	-0,0106/ -0,013	0,185		-0,0264/ -0,0325	0,186		-0,0522/ -0,0639	0,183		-0,0776/ -0,0943	0,177		-0,102/ -0,123	0,168	
2	-0,013/ -0,0136	0,044		-0,0325/ -0,0339	0,040		-0,0639/ -0,0665	0,039		-0,0943/ -0,0978	0,036		-0,123/ -0,127	0,031	
3	-0,0136/ -0,0137	0,013		-0,0339/ -0,0342	0,084		-0,0665/ -0,0671	0,009		-0,0978/ -0,0986	0,008		-0,127/ <b>-0,1275</b>	<b>0,004</b>	
4	-0,0137/ <b>-0,01373</b>	<b>0,002</b>	116,952	-0,0342/ <b>-0,0343</b>	<b>0,002</b>	116,702	-0,0671/ <b>-0,0673</b>	<b>0,002</b>	115,837	-0,0986/ <b>-0,0987</b>	<b>0,001</b>	114,447			



**Рис. 4.** Зависимость межцентрового расстояния  $A$  от кинематического передаточного отношения  $i$ :  
 ВР — встречное резание; ПР — попутное резание

Из приведенных графиков видно, что межцентровое расстояние  $A$  находится в прямой зависимости от кинематического передаточного отношения  $i$  и в обратной зависимости от требуемой длины прорези  $l$ .

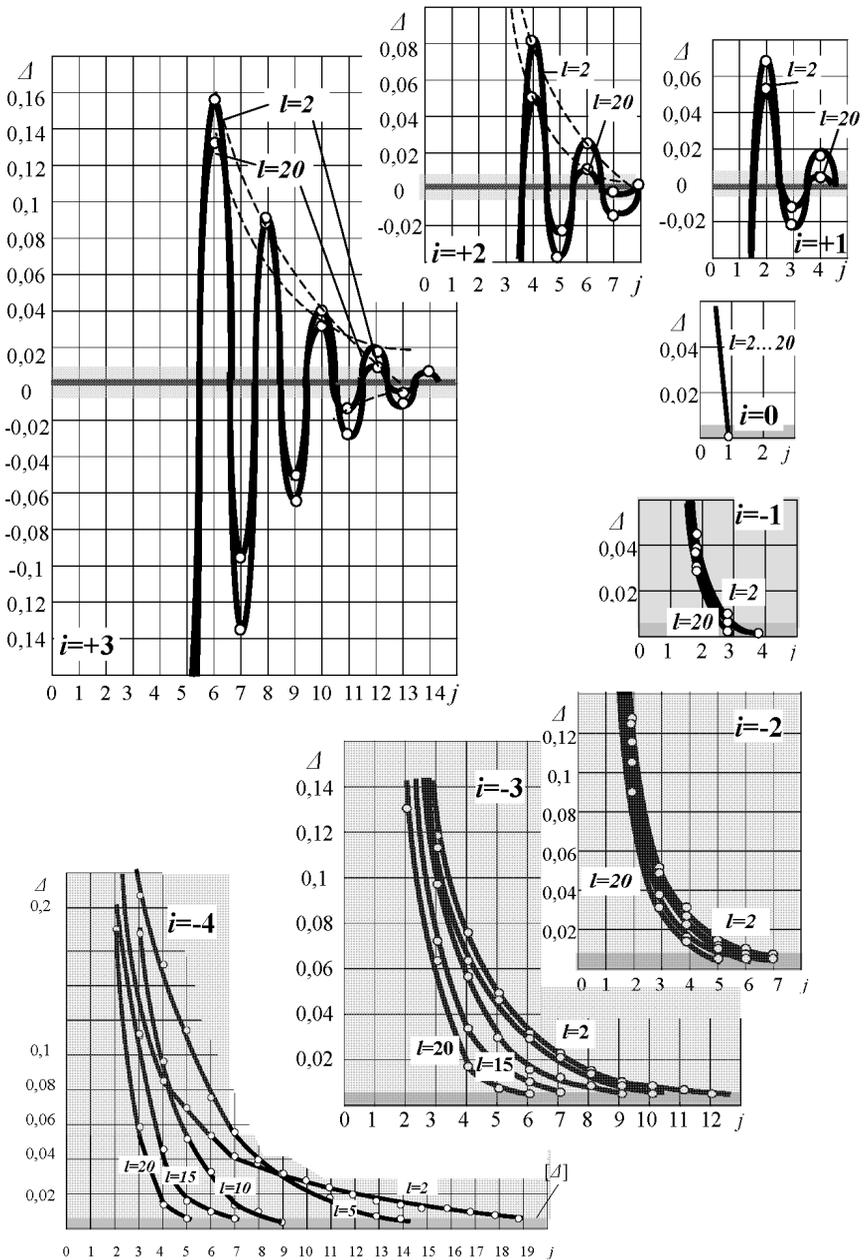
Для заданного диапазона варьирования  $i$  интенсивное изменение параметра  $A$  наблюдается в нижней части диапазона, т.е. при попутном резании. Это означает, что в этой части диапазона чувствительность функции  $A = f(i)$  наиболее высокая, что дает основание рекомендовать его при определении режимов обработки с точки зрения обеспечения простоты регулировки межцентрового расстояния.

Расчет массива данных (см. рис. 4) проводился с допустимой относительной погрешностью вычислений  $[\Delta] = 0,005$ .

На рис. 5 показан процесс изменения относительной погрешности вычислений  $\Delta$  от числа итераций  $j$ .

Из рис. 5 видно, что увеличение абсолютной величины кинематического передаточного отношения  $i$  приводит к росту необходимого числа итераций для обеспечения требуемой точности расчета. При  $i = 0$ , т.е. при обработке невращающейся детали, вычисления заканчиваются уже на первой итерации. В области попутного резания наблюдается монотонное изменение относительной погрешности вычислений, а в области встречного резания — колебательное знакопеременное изменение погрешности.

Приведенный метод позволяет проводить вычисления по алгебраическим и трансцендентным уравнениям с любой заданной погреш-



**Рис. 5. Динамика погрешности вычислений рекуррентной функции:**  
 ВР – встречное резание; ПР – попутное резание

ностью и может быть использован при кинематических и динамических расчетах в машиностроительных задачах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугров Я. С., Никольский С. М. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии. – М.: Наука, 1980. – 176 с.

Вячеслав Сергеевич Иванов родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зам. директора НИИ КМТП МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 73 научных работ и авторских свидетельств в области разработки и испытаний технологического оборудования.

V.S. Ivanov (b. 1949) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. Ph. D. (Eng.), senior researcher, deputy director of the Research Institute for Special Mechanical Engineering of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 73 publications in the field of development and tests of technological equipment.

Дмитрий Вячеславович Иванов родился в 1985 г., студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных публикаций в области обработки металлов резанием.

D.V. Ivanov (b. 1985) – student of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of machining.

---

## **В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет книга**

**Лысенко Л.Н.** Наведение и навигация баллистических ракет: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 672 с.

Изложены научные и методологические основы наведения и навигации летательных аппаратов баллистического типа. Рассмотрены вопросы программирования движения (задачи наведения) и информационно-навигационного обеспечения управления (задачи навигации), а также проблемы статистической динамики полета — оценивание движения и определение точности стрельбы (задачи оценки точности возмущенного движения). Показаны направления решений соответствующих задач при создании существующих ракетных комплексов тактического, оперативно-тактического и стратегического назначений, возможные пути совершенствования баллистико-навигационного обеспечения полета ракет последующих поколений.

Для студентов технических вузов, слушателей военных академий, а также аспирантов, инженеров и научных работников, специализирующихся в области баллистики, динамики полета и управления движением летательных аппаратов.