

УДК 621.7.075, 621.9.02

## Реализация метода деформирующего резания ротационными резцами. Определение геометрических параметров зоны обработки

**Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, А.В. Седов**

*Предложен новый метод обработки — деформирующее резание (ДР) инструментом типа тела вращения. Разработан алгоритм и выполнен расчет основных геометрических параметров инструмента по длине активного участка главной режущей кромки. Установлено, что в реальном диапазоне условий ротационного ДР значения всех установочных углов резца резко изменяются вблизи вершины инструмента.*

**Ключевые слова:** деформирующее резание, ротационный резец, установочные углы.

*The article proposes a new processing method - a deformation cutting by a rotating tool. The authors have developed an algorithm for calculating basic geometric parameters of the tool along the active length of the main cutting edge. It is established that the values of all tool setting angles differ markedly near the tool point.*

**Keywords:** deformation cutting, rotating tool, tool setting angles.

Метод деформирующего резания (ДР) основан на процессе частичного срезания припуска и целенаправленного пластического деформирования подрезанного поверхностного слоя [1]. При работе обычного токарного резца разрушение припуска происходит по линиям проекций как главной, так и вспомогательной режущих кромок. Основное отличие резца для ДР состоит в том, что инструмент имеет вспомогательную кромку, на которой исключен процесс резания. Это достигается назначением переднего угла на вспомогательной кромке  $\gamma_1 < -50^\circ$ . При работе таким инструментом материал разрушается по линии проекции главной режущей кромки, а по линии проекции вспомогательной кромки разрушения не происходит. Стружка по своей узкой стороне остается прикрепленной к детали. Сечение подрезанного слоя сохраняет механическую связь с обрабатываемой заготовкой, что позволяет направленно деформировать подрезанный слой с образованием ребра. Совокупность ребер формирует на поверхности детали развитый макрорельеф в виде оребрения с возможностью увеличения площади поверхности после обработки до 14 раз. Метод нашел применение для получения высокоэффективных теплообменных поверхностей, изготовления щелевых трубчатых фильтров и сеток из металлических листов, получения композиционных самосмазываю-



**ЗУБКОВ**  
Николай Николаевич  
доктор технических наук,  
профессор, начальник  
лаборатории  
НИИ КМ и ТП  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



**ОВЧИННИКОВ**  
Александр Иванович  
кандидат технических  
наук, доцент



**СЕДОВ**  
Александр Владимирович  
выпускник

кафедры  
«Инструментальная  
техника и технологии»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

щихся покрытий на деталях трения, восстановления размеров изношенных деталей, изготовления капиллярных структур для тепловых труб, подготовки поверхности деталей под нанесение керамических и твердосплавных покрытий, изготовления электрических соединителей и др. [2].

Инструмент для ДР представляет собой резец, режуще-деформирующая часть которого образована тремя плоскостями [1]. Резание ротационными резцами с отделением стружки описано в работах [3–6]. В данной статье предлагается и рассматривается инструмент ротационного типа для реализации метода ДР в виде усеченного конуса с передней поверхностью на его боковой стороне, как принудительно, так и самовращающийся. Такой вариант реализации ротационного резания с отделением стружки описан как вторая схема в книге [3]. Схема реализации ДР по схеме точения вращающимся инструментом для формирования оребрения теплообменного назначения на трубной заготовке показана на рис. 1.

Основной идеей использования ротационного инструмента является расширение возможностей метода ДР путем увеличения диапазона типоразмеров получаемого оребрения. Для самовращающегося резца это возможно за счет снижения трения на его передней поверхности об обрабатываемый материал путем частичной замены трения скольжения на трение качения. Для принудительно вращающихся резцов расширение возможностей метода ДР достигается за счет дополнительного движения вдоль режущей кромки, которое уменьшает кинематический угол заострения тела резца. Снижение трения или снижение угла заострения инструмента уменьшает силы и позволяет использовать большие глубины резания при заданной подаче или меньшие подачи при заданной глубине резания, при которых отделения стружки не происходит, т. е. достигается максимальное увеличение площади оребренной поверхности после обработки. Кроме этого применение ротационного инструмента для ДР повышает стойкость инструмента по сравнению с обычным инструментом для ДР как за счет большей длины режущей кромки, участ-

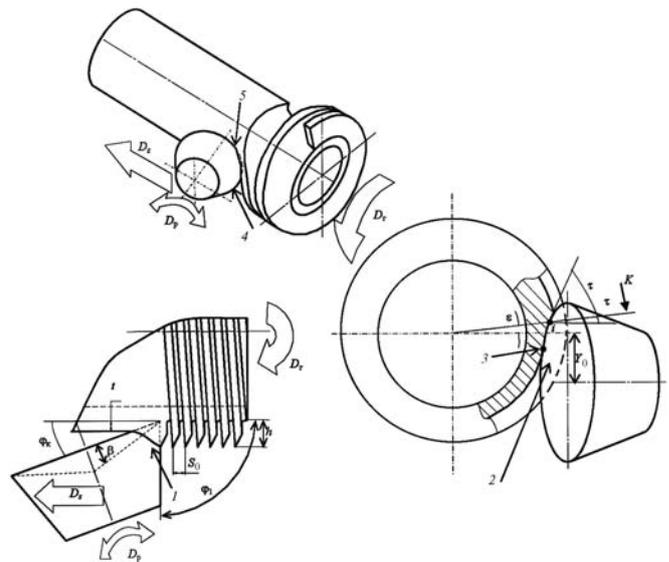


Рис. 1. Принцип ротационного ДР:

- 1 — передняя поверхность; 2 — главная задняя поверхность; 3 — вершина резца;
- 4 — вспомогательная задняя поверхность;
- 5 — главная режущая кромка

вующей в процессе резания при вращении резца, так и за счет снижения скорости трения и тепловыделения между контактными поверхностями инструмента и заготовки в случае самовращающегося резца. Возможно использование также и невращающегося в процессе резания резца с его периодическим поворотом по мере износа кромки. При этом линейный износ не накапливается на одном неподвижном участке режущего лезвия как для обычного инструмента, а равномерно распределяется по всей его длине. Еще одно преимущество ротационного ДР — простота формы его рабочей части, которая образована только двумя поверхностями — конусом и плоскостью или двумя коническими поверхностями в случае поднутрения основания конуса  $\beta$ .

Для предложенного ротационного резца ДР передней поверхностью 1 (см. рис. 1) является поверхность конуса, которая плавно переходит во вспомогательную заднюю поверхность 4 инструмента. Главная режущая кромка 5 (часть окружности основания конуса) находится в контакте с заготовкой. Вершиной 3 ротационного резца для ДР является точка главного режущего лезвия, имеющая наименьшее расстояние до оси детали, т. е. наиболее заглубленная в заготовку точка режущей кромки. Роль де-

формирующей кромки выполняет образующая конуса, проходящая через вершину резца. Главная задняя поверхность 2 — бóльший торец конуса. В случае поднутрения основания конуса главной задней поверхностью 2 является коническая поверхность, а вспомогательной задней поверхностью 4 — поверхность конуса, лежащая ниже деформирующей кромки (см. рис. 1).

Специфика ДР накладывает особенности установки ротационного резца. В инструментальной системе координат главным углом инструмента в плане  $\varphi$  для ротационного ДР является угол разворота основания конуса  $\varphi_k$  относительно оси заготовки. Для получения вертикальных ребер образующая конуса резца должна быть перпендикулярна оси обрабатываемой заготовки, т. е. вспомогательный угол инструмента в плане будет составлять  $\varphi_1 = 90^\circ$ .

Специфическая геометрия резца типа тела вращения накладывает свои ограничения на рабочие углы инструмента, от которых зависит как осуществимость процесса ДР (т. е. условие обеспечения положительного заднего угла  $\alpha$  и условие неотделения стружки), так и геометрические параметры оребрения. Применение инструмента такой конструкции предъявляет также особые требования к установке резца на металлорежущем оборудовании. Обеспечение положительного заднего угла  $\alpha$  для ротационного резца может осуществляться поднутрением бóльшего торца конуса на угол  $\beta$ , смещением резца ниже линии центров станка на величину  $Y_0$  (см. рис. 1) или поворотом оси резца на угол  $\alpha$ . Наиболее простой вариант обеспечения заднего угла  $\alpha$  — смещение оси резца ниже линии центров станка и поднутрение торца конуса. Следует отметить, что смещение резца ниже оси заготовки приводит к повороту основной плоскости, относительно которой измеряются все установочные угловые параметры резца.

Поскольку вершина инструмента находится ниже линии центров токарного станка и при внедрении инструмента она движется не по радиусу заготовки, необходимо знание текущих координат вершины резца  $x$  и  $y$  (рис. 2) и расчет перемещения резца, отсчитываемого по

лимбу поперечной подачи для обеспечения заданной глубины резания  $t$ . Исходной системой координат для решения данной задачи выбрана система  $XYZ$  с центром  $O$ , показанная на рис. 2 (здесь и далее на сечениях контур получаемого оребрения не показан). Сечением  $A-A$  заготовки на глубине резания  $t$  является эллипс 5, описываемый уравнением

$$\left(\frac{y}{R-t}\right)^2 + \left(\frac{x \sin \varphi_k}{R-t}\right)^2 = 1,$$

где  $R$  — радиус заготовки;  $t$  — глубина резания.

Главной режущей кромкой инструмента является окружность 2, описываемая уравнением

$$(y - Y_0)^2 + (x - X_0)^2 = R_p^2,$$

где  $Y_0$  — смещение центра резца ниже оси заготовки;  $X_0$  — расстояние между осью заготовки

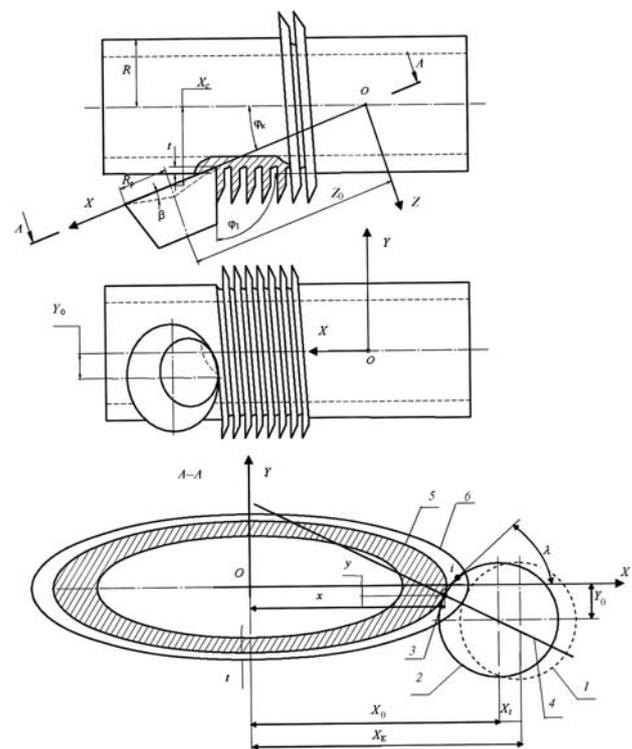


Рис. 2. Схема определения координат вершины и смещения резца  $X_0$  для обеспечения заданной глубины резания  $t$ :

- 1 — положение резца при касании заготовки;
- 2 — положение резца при заданной глубине резания  $t$ ;
- 3 — вершина инструмента;
- 4 — нормаль к вершине резца и заготовке;
- 5 — сечение заготовки на глубине резания  $t$ ;
- 6 — контур поверхности заготовки

и центром основания конуса резца;  $R_p$  — радиус основания конуса резца.

Уравнение нормали 4 (см. рис. 2) в точке вершины резца имеет вид

$$y + Y_0 = -a^2(x - X_0) \frac{\sqrt{1 - x^2/a^2}}{bx},$$

где  $a = (R - t) / \sin\varphi_k$ ;  $b = R - t$ .

Совместное численное решение приведенных выше уравнений в среде MathCad позволило определить необходимое перемещение резца  $X_t$  от касания заготовки для обеспечения заданной глубины резания  $t$ , а также координаты вершины резца  $x$  и  $y$ .

Для расчета установочных геометрических параметров инструмента в рассматриваемой точке его режущей кромки должны быть известны текущие координаты  $x_t$  и  $y_t$  в координатах  $XYZ$ . Они определяются путем совместного решения уравнений окружности основания конуса инструмента и произвольного эллипса в сечении  $A-A$ .

Отметим, что угол поворота основной плоскости, которая перпендикулярна вектору скорости резания для каждой рассматриваемой точки режущего лезвия, будет различный и зависит от ее положения относительно оси заготовки. Поэтому определение установочных заднего  $\alpha_y$  и переднего углов  $\gamma_y$  выполнялось последовательным расчетом статических ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ) и радиальных ( $\alpha_r$ ,  $\gamma_r$ ) углов.

Схема определения статического заднего угла показана на рис. 3. Уравнение задней поверхности (конуса поднутрения) в системе координат  $X_1Y_1Z_1$  имеет вид

$$x_1^2 + y_1^2 = (R_p - z_1 \operatorname{tg}\beta)^2.$$

Уравнение кривой 7 (см. рис. 3) в сечении  $B-B$ , перпендикулярном основанию конуса в рассматриваемой точке  $i$  (след задней поверхности), имеет следующий вид:

$$y = \sqrt{(R_p - z_1 \operatorname{tg}\beta)^2 - (X_0 - x_t)^2}.$$

Из этого уравнения можно определить статический задний угол  $\alpha$  (см. рис. 3) как производную:  $\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) = dy_1/dz_1$ .

Радиальный задний угол в соответствии с работой [7] составит

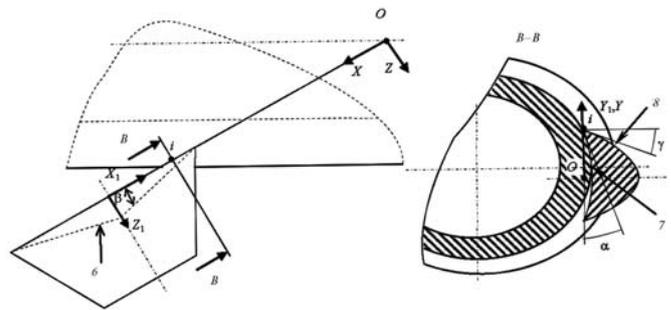


Рис. 3. Схема определения заднего  $\alpha$  и переднего  $\gamma$  статических углов

$$\alpha_r = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\cos\varphi_k}\right).$$

Статический угол наклона главной режущей кромки  $\lambda$  (см. рис. 2) в рассматриваемой точке

$$\lambda = \operatorname{arctg}\left(\frac{x_0 - x_t}{\sqrt{R_p^2 - (x_0 - x_t)^2}}\right).$$

Для расчета установочных углов в  $i$ -й точке должны быть известны также углы  $\tau$  и  $\varepsilon$  (см. рис. 1):

$$\tau = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}\lambda}{\sin\varphi_k}\right); \quad \varepsilon = \operatorname{arcsin}\left(\frac{y_t}{R_t}\right),$$

где  $R_t$  — расстояние  $i$ -й точки от оси заготовки, которое вычисляется по известным  $x_t$  и  $y_t$ .

Получим выражения для установочных углов.

Установочный главный угол инструмента в плане в  $i$ -й точке (рис. 4)

$$\varphi_y = \operatorname{arctg}\left(\operatorname{tg}\varphi_k \frac{\cos(\tau - \varepsilon)}{\cos\tau}\right).$$

Установочный главный задний угол в рассматриваемой точке

$$\alpha_y = \operatorname{arctg}\left[\operatorname{tg}(\alpha_r - \varepsilon) \cos\varphi_y\right].$$

Установочный угол наклона главной режущей кромки

$$\lambda_y = \operatorname{arctg}\left[\sin\varphi_y \operatorname{tg}(\tau - \varepsilon)\right].$$

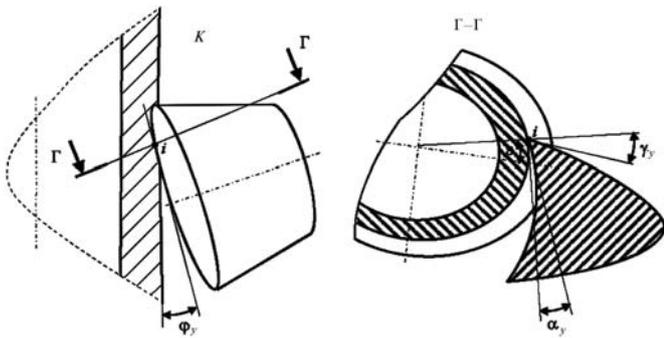


Рис. 4. К определению установочных углов  $\phi_y, \lambda_y, \alpha_y$  (вид К с рис. 1)

Установочный передний угол

$$\gamma_y = \arctg \left( \operatorname{tg} \phi_y \operatorname{tg} \lambda_y + \frac{\operatorname{tg}(\gamma_r + \varepsilon)}{\cos \phi_y} \right),$$

где  $\gamma_r$  — радиальный передний угол, который рассчитывается аналогично углу  $\alpha$  через уравнение касательной к следу уже не задней, а передней поверхности (кривая 8 на рис. 3).

Таким образом, предложенная система уравнений позволяет рассчитать угловые установочные параметры инструмента в любой точке активного участка его режущей кромки при изменении таких исходных параметров как глубина резания  $t$ , вертикальное смещение оси инструмента  $Y_0$ , угол конуса инструмента  $\phi_k$ , радиус заготовки  $R$  и радиус основания конуса резца  $R_p$ .

На основании расчетов построены графики изменения установочных углов резца по координате  $l$ , измеряемой от поверхности заготовки до рассматриваемой точки режущего лезвия. Рассматривалась заготовка с  $R = 10$  мм и инструмент с углом поднутрения  $\beta = 5^\circ$ , установленный с  $\phi_1 = 90^\circ$  при изменении  $t = 0,49 \dots 0,98$  мм,  $Y_0 = -(2,0 \dots 5,7)$  мм,  $\phi_k = 23 \dots 45^\circ$  и  $R_p = 8 \dots 16$  мм.

Из анализа графиков следует, что зависимости изменения установочных углов резца от любого из указанных выше параметров качественно одинаковые, поэтому далее приведены характерные графики изменения установочных углов (рис. 5–8) для смещения резца ниже оси заготовки:  $Y_0 = -2$  (на графиках обозначены  $\square$ ),  $-Y_0 = -3, 4$  (обозначены  $\Delta$ ) и  $Y_0 = -5,7$  мм (обозначены  $\diamond$ ). Постоянными оста-

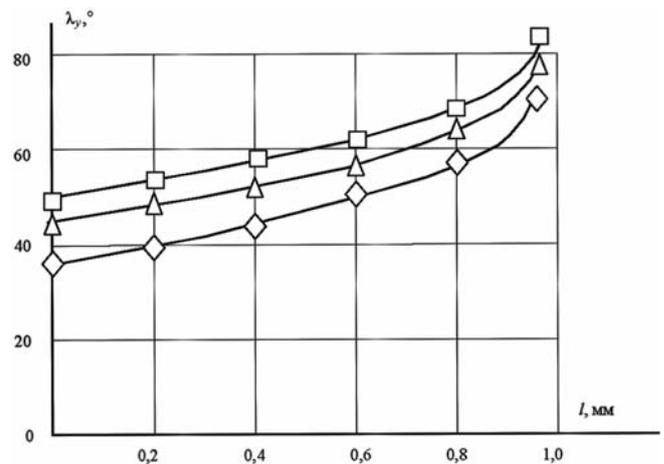


Рис. 5. Влияние величины заглабления  $l$  на угол наклона главной режущей кромки  $\lambda_y$  в рассматриваемой точке для разных величин смещения  $Y_0$

вались величины:  $t = 0,98$  мм,  $\phi_k = 34^\circ$ ,  $R_p = 10$  мм,  $\beta = 5^\circ$ ,  $\phi_1 = 90^\circ$ .

На рисунке 5 видно, что опускание резца ниже оси заготовки приводит к уменьшению установочного угла наклона главной режущей кромки  $\lambda_y$ , величина которого быстро увеличивается и максимальна на вершине резца, достигая значения  $82^\circ$  для  $Y_0 = -5,7$  мм.

Установочный главный угол инструмента в плане  $\phi_y$  медленно уменьшается по большей части режущей кромки (см. рис. 6) и резко падает по мере приближения к вершине резца с исходных  $35 \dots 45^\circ$  почти до нуля, причем это

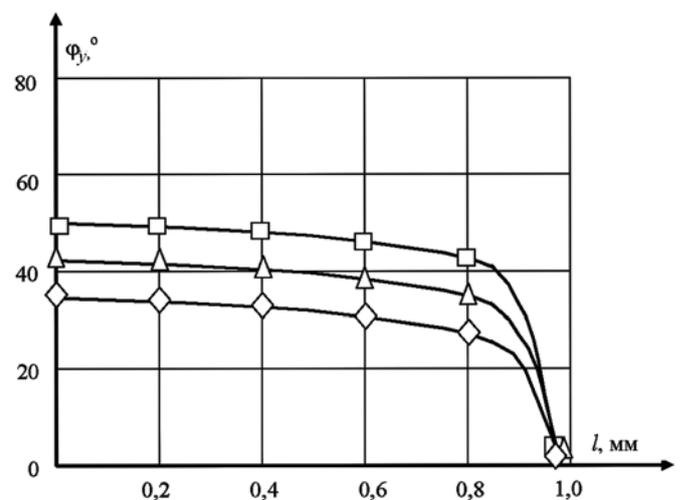


Рис. 6. Влияние величины заглабления  $l$  в рассматриваемой точке режущей кромки на главный угол инструмента в плане  $\phi_y$  для разных величин смещения  $Y_0$

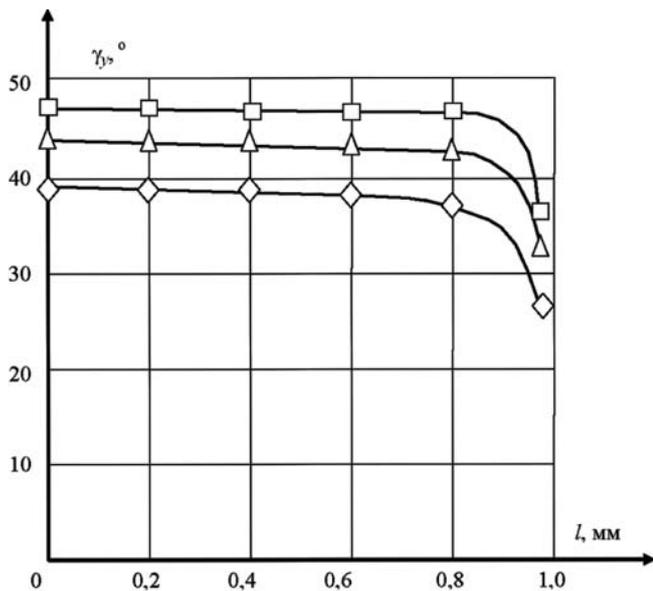


Рис. 7. Влияние величины заглубления  $l$  в рассматриваемой точке режущей кромки на передний угол инструмента  $\gamma_y$  для разных величин смещения  $Y_0$

происходит независимо от исходного смещения  $Y_0$ . При увеличении смещения реза ниже оси заготовки значение угла  $\phi_y$  уменьшается.

Изменения установочного переднего угла  $\gamma_y$  практически не происходит на большей части режущей кромки инструмента (см. рис. 7) и только непосредственно вблизи вершины реза передний угол резко падает до  $27...36^\circ$ . В целом, отмечаются большие величины значений  $\gamma_y = 38...46^\circ$  для активного участка режущей кромки.

Значение установочного заднего угла  $\alpha_y$  монотонно возрастает (см. рис. 8) и этот рост ускоряется по мере приближения к вершине реза. В среднем  $\alpha_y$  будет тем больше, чем ниже опущен резец. Отметим, что на периферийном участке режущей кромки наблюдаются отрицательные значения угла  $\alpha_y$ . При небольшом смещении  $Y_0$  зона отрицательных  $\alpha_y$  велика (при  $Y_0 = -2$  мм значение  $\alpha_y$  меньше нуля до 0,9 мм из возможных практически 1 мм).

Формально резание с отрицательными задними углами считается невозможным, однако опыт реализации как обычного, так и ротационного ДР для пластичных материалов показывает, что в случае, когда небольшая периферийная часть главной режущей кромки имеет от-

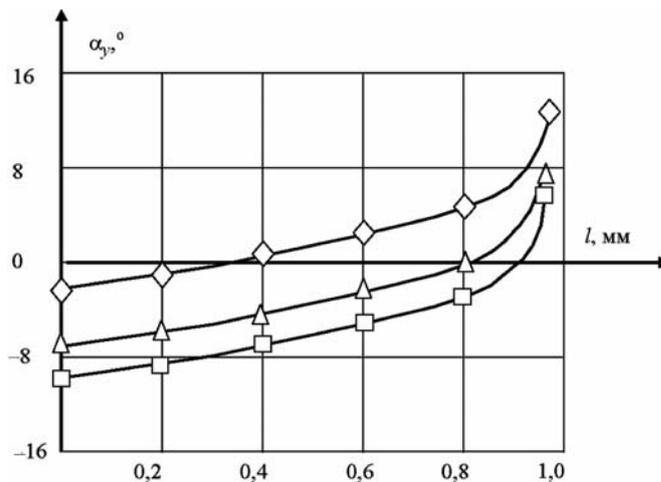


Рис. 8. Влияние величины заглубления  $l$  в рассматриваемой точке на главный задний угол инструмента  $\alpha_y$  режущей кромки для разных величин смещения  $Y_0$

рицательное значение  $\alpha_y$ , процесс резания такой режущей кромкой осуществим за счет пластического оттеснения материала с поверхности резания на обрабатываемую поверхность. Величина соотношения длин участков кромки с положительными и отрицательными значениями задних углов, при котором прекращается процесс резания, требует отдельных исследований. В любом случае на главную заднюю поверхность ниже участка главной режущей кромки с отрицательными значениями заднего угла воздействуют дополнительные нагрузки. Рисунок 8 показывает, что принятые для рассмотрения исходные параметры не обеспечивают положительного угла на всей длине режущей кромки, т. е. требуется увеличение угла поднутрения  $\beta$  или опускание реза еще ниже линии центров станка. В последнем случае вблизи вершины реза будут наблюдаться еще меньшие значения установочных переднего и главного угла инструмента в плане.

С практической точки зрения при реализации метода ДР ротационными резцами кроме зависимости  $\alpha_y = f(l)$  большую значимость имеет полученный график изменения установочного главного угла инструмента в плане  $\phi_y$ , поскольку от его значения зависит как профиль ребер получаемого макрорельефа, так и его высота, что будет рассмотрено в дальнейшем.

## Выводы

1. Предложен новый способ реализации метода ДР — ротационное деформирующее резание самовращающимся, принудительно вращающимся или периодически вращающимся резцом типа тела вращения.

2. Теоретически решена задача расчета основных установочных геометрических параметров конического резца для любой точки активного участка режущего лезвия. Построены зависимости изменения установочных углов по длине кромки в зависимости от параметров резца и его установки на станке.

3. Проведен анализ влияния исходных параметров обработки на установочные углы инструмента конической формы. Установлено, что в реальном диапазоне условий ротационного ДР значения всех установочных углов резца резко изменяются вблизи вершины инструмента.

4. При возрастании по абсолютной величине любого из входных параметров обработки установочные углы от периферии резания к вершине резца ведут себя следующим образом: угол наклона главной режущей кромки  $\lambda_y$  и задний угол  $\alpha_y$  возрастают, главный угол в плане  $\varphi_y$  и передний угол  $\gamma_y$  уменьшаются.

Для рассмотренных геометрических параметрах резца и его установки на станке имеется участок главной режущей кромки с отрицательными значениями заднего установочного угла  $\alpha_y$ .

## Литература

1. *Зубков Н.Н.* Многофункциональная технология увеличения площади поверхности для повышения теплообменных и технологических свойств деталей // Полет (авиация, ракетная техника и космонавтика). 2003. № 3. С. 41—46.
2. *Зубков Н.Н.* Бесстружечная технология лезвийной обработки // РИТМ. 2010. № 4(52). С. 18—20.
3. *Гик Л.А.* Ротационное резание металлов. Калининград: Калининградское книжное издательство, 1990. 254 с.
4. *Ящерицын П.И., Борисенко А.В., Дривотин И.Г., Лебедев В.Я.* Ротационное резание материалов. Мн.: Наука и техника, 1987. 229 с.
5. *Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В.* Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. Мн.: Наука и техника, 1972. 269 с.
6. *Бобров В.Ф., Иерусалимский Д.Е.* Резание металлов самовращающимися резцами. М.: Машиностроение, 1972. 112 с.
7. *Грановский Г.И., Грановский В.Г.* Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.

Статья поступила в редакцию 07.11.2011