УДК 621.91.01

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛА СДВИГА ПРИ РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Д.Т. ХОДЖИБЕРГЕНОВ*, *канд. техн. наук, доцент,
(*ЮКГУ им. М. Ауезова, Республика Казахстан, г. Шымкент*)

Статья поступила 17 января 2012 года

160002, Республика Казахстан, Южно-Казахстанская область,
г. Шымкент, ул. Гагарина, 147/26,
Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауезова, e-mail: had_ji@mail.ru

Приводятся результаты исследований угла сдвига при ротационной обработке, которые дают методическую возможность по уточнению его взаимосвязи с режимами резания, которые обусловливают силовые и температурные зависимости, а также качество обработанной поверхности.

Ключевые слова: угол сдвига, степень деформации, схема резания, вращение режущего инструмента, ротационные способы обработки, кинематический коэффициент, срезаемый слой.

Под действием режущего инструмента срезаемый слой подвергается пластической деформации. Образование зоны деформации при резании и доказательства природы деформации весьма противоречивы, что привело к возникновению двух направлений в подходе к данному вопросу. Возможно, доказательства модели с одной плоскостью сдвига превалируют над аналитическими исследованиями на модели с развитой зоной деформации. Однако В.Ф. Бобров [1], разделяя зону деформации на первичную и вторичную, предлагает упрощенную модель деформации. Он считает, что зона первичной деформации по своей толщине соизмерима с толщиной срезаемого слоя только при малых передних углах инструмента. Если бы между передней поверхностью инструмента и контактной поверхностью стружки отсутствовало трение, то на этом деформирование срезаемого слоя закончилось бы. Но, как показал Н.Н. Зорев [2], степень деформации в зоне вторичной деформации в 20 раз превышает среднюю деформацию стружки. При этом степень деформации определяется интенсивностью трения на передней поверхности.

Анализируя существующие методы изучения зоны деформации, можно предположить, что вытекающие аспекты деформации зависят от применяемых кинематических схем резания. В большинстве этих схем передняя грань резца, произведя давление на металл, создает в небольшой зоне впереди резца первоначально сложное упругонапряженное состояние, переходящее затем по мере продвижения резца в состояние пластической деформации. Последняя отчетливо распространяется в зоне, ограниченной поверхностью, расположенной под некоторым углом β_1. При определенных условиях резания, например при обработке хрупких, твердых или сильно наклёпывающихся металлов, сдвиг и даже полное скалывание элемента стружки происходит вдоль этой плоскости (точнее, поверхности). Легкость, с которой осуществляется деформация металла, существенно зависит от того, насколько направление действующих сил совпадает с направлением плоскости возможного сдвига. Деформация облегчается, когда срезающая сила параллельна плоскости сдвига. Обычно сдвиг происходит в плоскости, перпендикулярной пространственной диагонали куба [1].

Исследование зоны деформации, полученной традиционными методами обработки, затруднительно из-за присутствия трения скольжения на передней поверхности инструмента. Если же создать схему резания и иметь соответствующий инструмент, при котором возможно исключение трения скольжения между контактирующими поверхностями режущего инструмента и обрабатываемой детали, а сдвиг или разрушение металла производить строго в состоянии чистого сдвига, достигая значений угла поверхности сдвига $\beta_1 \approx 45^\circ$, то при этом должны иметь место минимальные силы деформации.

Существует ряд способов, при которых степень деформации снижается с уменьшением интенсивности трения на передней поверхности режущего инструмента за счет его вращения. К таким способам относятся ротационные способы обработки. В последнее время реализовано много способов ротационной обработки, но схемы резания и применяемые инструменты не дают большого различия в деформации срезаемого слоя [3]. Проскальзывание ротационного режущего инструмента (РРИ) в процессе резания создает трение скольжения между его режущей частью, сбегающей стружкой и обработанной поверхностью, что приближает процесс деформирования к традиционным методам. Самовращение РРИ неравномерное, так как оно происходит за счет сходящей стружки. При этом наклон режущей кромки, который создает сцепление сходящей стружки с передней поверхностью РРИ, является обязательным условием. Кроме этого существуют РРИ с принудительным вращением, где скорости инструмента и детали тоже имеют разные направления и значения. Большие расхождения значений, особенно в направлении скоростей детали и инструмента, создают условия для появления трения скольжения на контактных поверхностях [4].

Самовращение РРИ можно осуществлять, используя внутренние ресурсы процесса обработки, т. е. вращение детали и инструмента происходит так же, как в процессе ППД. Для этого необходимо участие задней поверхности режущего инструмента в процессе резания. Задние углы режущих элементов РРИ необходимо заточить так, чтобы не произошло существенной деформации обработанной поверхности. В процессе работы статический угол задней поверхности режущих элементов в кинематике должен достигнуть нулевого значения [5]. РРИ, как ведомый, и обрабатываемая деталь, как ведущая, создают фрикционную пару. Это дает возможность замены трения скольжения между контактирующими поверхностями режущего инструмента и обрабатываемой деталью на трение качения. При этом кинематический коэффициент [6] равняется единице, т. е. процесс самовращения будет происходить равномерно за счет геометрии режущих элементов, при этом наклон режущей кромки β_y не является обязательным условием. Предполагаем, что угол плоскости сдвига β_1 при ротационной обработке непосредственно связан с углом установки β_y, что и является целью исследования в настоящей работе.

Для определения угла сдвига исследования проведены при ротационной обработке с использованием многолезвийного ротационного инструмента (рис. 1) на токарно-винторезном станке модели 1К62 с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя. Обработке подвергались следующие материалы:

• наиболее вязкие – алюминий, латунь, как характерные материалы для изучения пластической деформации (σ_b = 320 Па, НВ 55);

• широко применяемые в исследованиях как эталон сталь 40Х (σ_b = 580 Па, НВ 183) и сталь 45 (σ_b = 610 Па, НВ 245).

На рис. 1 представлен ротационный режущий инструмент *1*, содержащий универсальную оправку *2*, предназначенную для обработки тел вращения и устанавливающуюся в резцедержатель токарного станка наряду с обычными призматическими резцами [7]. Державка *3* устанавливается под определенным углом установки β_y (рис. 1, разрез *B-B*) в резцедержатель станка и закрепляется. Геометрия режущих элементов ротационного режущего инструмента после заточки представлена на выносном элементе I (см. рис. 1). Ротационный режущий инструмент содержит три параллельно расположенных режущих элемента, которые имеют статические углы режущего клина 1_1, 1_2, 1_3, равные β_{ci} = 98,5…99º, задней поверхности 2_1, 2_2, 2_3 не более α_{ci} = 1…1,5º, передней поверхности 3_1, 3_2, 3_3 – γ_{ci} = 0.

Режущие элементы 1, изображенные на рис. 2, *а*, с определенным углом установки β_y приводят в соприкосновение с обрабатываемой

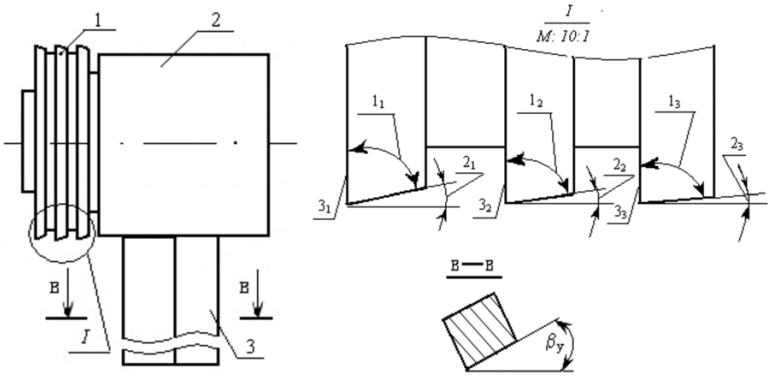


Рис. 1. Ротационный режущий инструмент:
1 – режущие элементы; *2* – корпус; *3* – державка

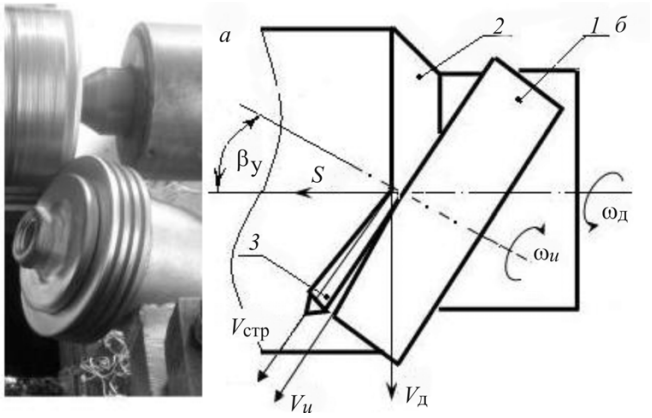


Рис. 2. Схема установки РРИ для точения:

а – врезание РРИ в заготовку; *б* – схема резания РРИ; *1* – режущие элементы; *2* – обрабатываемая деталь; *3* – отделяющаяся стружка; $\beta_у$ – угол установки режущих элементов; $\omega_д$ – угловая скорость детали; $\omega_и$ – угловая скорость режущих элементов; $V_д$ – линейная скорость детали; $V_и$ – линейная скорость режущих элементов

поверхностью заготовки *2*. Взаимодействие тел (как пара качения) задней поверхности 2_1, 2_2, 2_3 (см. рис. 1) режущих элементов и поверхности обрабатываемой детали придает самовращение режущим элементам.

С целью исключения влияния температуры в процессе ротационной обработки выбрана низкая скорость резания – 2…3 м/мин. Другие параметры режима резания, а также угол установки изменялись в следующих диапазонах (так как они не очень способствуют повышению температуры):

- подача $S = 0{,}07\ldots 0{,}95$ мм/об;
- глубина резания $t = 0{,}25\ldots 2$ мм;
- угол поворота оси МРРИ в горизонтальной плоскости $\beta_у = 0°\ldots 55°$.

Мгновенным прекращением процесса ротационного резания можно фиксировать процесс стружкообразования [1, 3], иллюстрированного на рис. 3.

Величина угла сдвига β_1 измерялась на инструментальном микроскопе УИМ–1. Особо следует отметить, что измерения не требуют применения метода «корня стружки», так как в отличие от других схем резания плоскость сдвига *3* (рис. 3) в нашем случае реально существует и совпадает с линией разрыва (скалывания), которая является огибающей линий скольжения [1, 3]. Угол сдвига β_1', изображенный в разрезе А-А (рис. 3, *в*), проведенном в плоскости параллельно линии центров станка и вдоль обрабатываемой детали, является проекцией угла сдвига β_1 в истинном сечении. Измерение угла сдвига β_1' осуществляется между линией $\overline{nA}$, проходящей по обработанной поверхности *1* (рис. 3, *в*), и линией $\overline{mA}$, которая, совпадая с плоскостью сдвига, пересекает касательную *k* к выпуклой кривой в точке *C*, а также линию $\overline{nA}$ в точке *A*.

На рис. 3, *а* видно, как срезаемый слой *2*, деформируясь, превращается в стружку ΔABC (сечение *А-А*). Передняя поверхность РРИ, соприкасаясь со стороной $\overline{AB}$ срезаемого слоя *2*, легко деформируя [8], уводит его из зоны резания в виде стружки (рис. 3). Образовавшаяся стружка, имея треугольную форму, принимает значение $\angle ACB \approx 45°$ со стороной, которая получилась при скольжении по $\overline{CA}$ поверхности сдвига *3* (рис. 3). Если провести линию $\overline{Ct}$ перпендикулярно к линию $\overline{nA}$, то получим четырехугольную форму *ABCD*, которая состоит из двух треугольников: ΔACB и ΔACD. Известно, что внутренние накрест лежащие углы *ACB* и *CAD* диагонали $\overline{AC}$ равны. Следовательно, при значениях $\angle ACB \approx 45°$ $\angle CAD$ должен

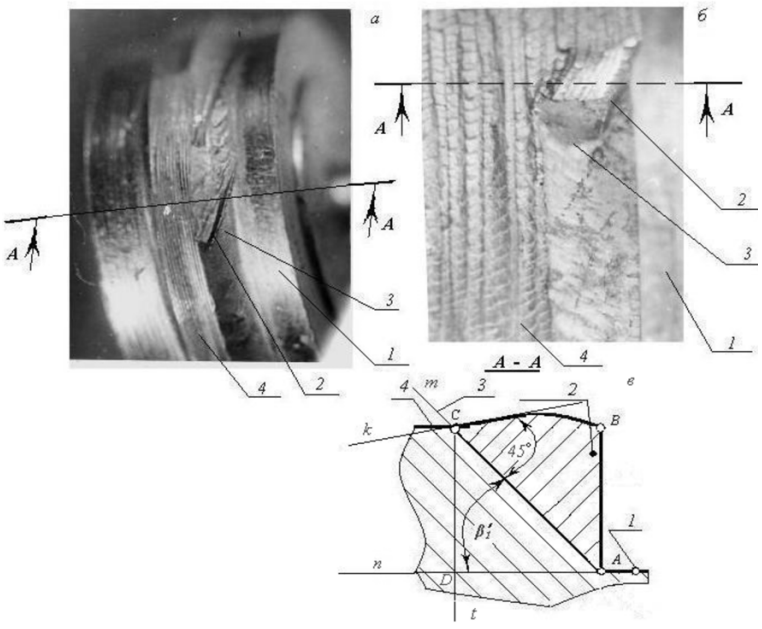


Рис. 3. Характер плоскости сдвига при ротационной обработке:

а – сталь 40Х; *б* – алюминий АЛ 68; *в* – схема измерения угла сдвига; *1* – обработанная поверхность; *2* – срезаемый слой; *3* – плоскость сдвига; *4* – необработанная поверхность заготовки

иметь значение 45º. Из схемы видно, что $\angle CAD$ и исследуемый параметр угла сдвига β_1' одно и то же.

Для определения формы и размеров стружки изготавливался специальный шлиф (для фиксации стружки использовалась эпоксидная смола). Измерив $\angle ACB$ стружки, определяли расчетное значение угла сдвига β_1', что точно подтверждается экспериментально (рис. 4). Сломав сдвигаемый слой *2* (рис. 3, *б*) до начала линии скалывания, произведено измерение значений угла сдвига β_1' по схеме рис. 3, *в*.

Кроме этого, измерялась твердость стружки на ПМТ-3 при нагрузке P = 50 г, при этом величина микротвердости 1,854 P/d^2 кг/мм^2, P – нагрузка на индентор, г; d – диагональ отпечатка, мкм. Результаты измерений показывают, что с увеличением угла установки деформирование срезаемого слоя возрастает, так как при углах установки β_y = 20… 25º твердость не превышает 260 кг/мм^2, а при 20º < β_y > 25º твердость больше 290 кг/мм^2. При этом величина коэффициента усадки стружки K_L близка к единице, а срезанный слой – стружка (в нашем случае сдвигаемый слой) незначительно подвергается деформации [8]. Угол схода стружки имеет одинаковые значения с углом установки в кинематике $\beta_{y\,к}$. Отделившаяся стружка направляется в сторону направления скорости детали (см. рис. 2).

Приводим некоторые экспериментальные данные по измерению угла сдвига β_1' (рис. 4). Из рис. 4 видно, что в некоторых определенных значениях угла установки β_y и подачи S угол сдвига β_1' достигает примерно 45°. В случае, если угол сдвига равен $\beta_1' \approx 45°$, то должен происходить «чистый сдвиг» [6].

При возрастании подачи S увеличивается значение β_1'. Причиной этому служит зависимость значения результирующей скорости резания V_e от подачи. Создавая отрицательный задний угол $\alpha_к$ в режущих элементах РРИ и получая фрикционную пару деталь – режущий инструмент (рис. 2), можно предположить, что для самовращения наклон режущей кромки не является обязательным условием. Стружка, охватывая переднюю поверхность РРИ, перемещается вместе с ним в одном направлении. Практически полностью исключается тангенциальное про-

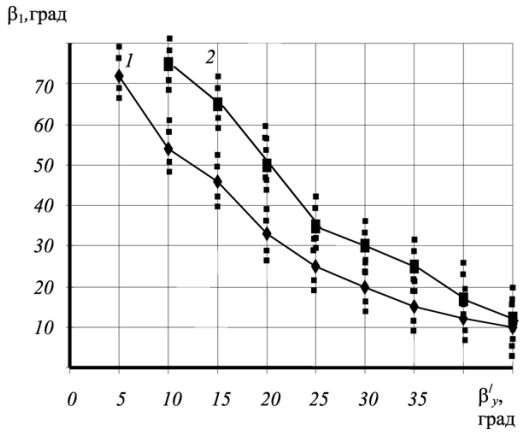


Рис. 4. Зависимость угла сдвига β_1' от угла установки β_y, при различных подачах S. Режимы резания: V = 3 м/мин; t = 1 мм; обрабатываемый материал – сталь 40Х; инструментальный материал – Р6М5;
1 – S = 0,1 мм/об; *2* – S = 0,26 мм/об

скальзывание между стружкой и передней поверхностью РРИ. Стружка обтекает переднюю поверхность резца (можно провести аналогию с парой ремень – шкив) и принимает форму пространственной спирали с шагом, примерно равным длине периметра лезвия.

По результатам экспериментов выяснилось, что наиболее заметное влияние на угол сдвига β_1' оказывает угол установки β_y. Это обстоятельство объясняется тем, что при увеличении β_y передний кинематический угол уменьшается.

Многие исследователи считают, что угол сдвига β_1 имеет большое значение для процесса резания, ибо его величиной определяется усадка стружки [1].

Выполненные эксперименты по определению угла сдвига β_1', коэффициентов усадки стружки [8], аналитического переднего угла $\gamma_к$ дают методическую возможность по уточнению взаимосвязи переднего угла γ и угла сдвига β_1'.

Проведены расчеты угла сдвига β_1 по теориям Тиме [9] и Мерчанта [10]:

$$\operatorname{tg}\beta_1 = \frac{\cos\gamma}{K_l - \sin\gamma} \qquad (1)$$

где K_l – коэффициент усадки стружки;

$$\operatorname{tg}\beta_q = \frac{r\cos\gamma}{l - r\sin\gamma}, \qquad (2)$$

где β_q эквивалентно β_1; r – коэффициент уширения стружки; l – эффект укорочения передней поверхности режущего лезвия.

Если сопоставить расчетные и экспериментальные данные угла сдвига β_1', то можно заметить, что в диапазонах угла установки $\beta_y = 20\ldots25°$ использование уравнений (1) и (2) правомочно, так как в этом диапазоне разница значений расчетного и экспериментального углов сдвига составляет +3°50′, –4°, +0°10′. При $\beta_y < 20°$ погрешность расчетного и экспериментального углов сдвига возрастает до +13°50′, –15°.

Для аналитических исследований угла сдвига и уточнений экспериментальных данных в нашем случае правомочной оказалась формула по теории Мерчанта, так как расхождение в значениях экспериментальных данных и расчетных составляют +13°50′, –15°, а по теории Тиме +19°50′, –23°.

Результаты проведенных исследований показали, что в условиях рационального построения схемы резания при ротационной обработке механизм деформации иной, нежели в традиционных способах обработки. Изменяется направление плоскости сдвига (угол β_1) относительно передней поверхности инструмента. Это изменение позволяет практически минимизировать непосредственный и непрерывный контакт поверхностей инструмента с материалом, находящимся на этой плоскости. Обновляя режущую кромку РРИ со скоростью, равной скорости схода стружки, скорости детали $V_д$, стружки $V_{стр}$ и инструмента $V_и$ имеют небольшие расхождения в направлениях и значениях (рис. 2), в то время как при традиционных схемах они практически направлены противоположно.

В процессе исследований разработана новая методическая возможность по уточнению зависимости угла сдвига от геометрии инструмента за счет замены трения скольжения на контактных поверхностях обкатыванием.

Принцип прогрессивности – многолезвийность, он позволяет предусматривать в конструкции инструмента черновые, чистовые и калибрующие режущие кромки, что должно способствовать получению весьма качественной обработанной поверхности с повышенными механическими свойствами и точностью геометрических размеров.

Многолезвийная ротационная обработка может быть реализована на токарном, строгальном и фрезерном станках на режимах чернового и получистого точения:

- скорость резания $V = 50\ldots200$ м/мин;
- подача $S = 0{,}2\ldots1{,}2$ мм/об;
- глубина резания $t = 0{,}1\ldots5$ мм.

Возможна комбинированная обработка непосредственно в процессе резания, т.е. реализация поверхностного пластического деформирования, упрочнения и выглаживания.

Список литературы

1. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
2. *Зорев Н.Н.* Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с.
3. *Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В.* Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. – Минск: Наука и техника, 1972. – 272 с.
4. *Ящерицин П.И., Борисенко А.В.* и др. Ротационное резание материалов. – Минск.: Наука и техника, 1987. – 229 с.
5. *Ходжибергенов Д.Т., Абдукаримов А.* Кинематические параметры процесса резания при ротационной обработке // Проблемы механики. Журнал Академии наук РУз (Ташкент). – 2000. – С. 66–69.
6. *Ходырев В.И.* Анализ и классификация схем ротационного резания // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1975. – № 4. – С. 159–162.
7. *Патент РК* № 24688. Ротационный режущий инструмент / Д.Т. Ходжибергенов, А.К. Жусипбеков, Б.М. Суннатов: опубл. 17.10.2011, бюл. № 10.
8. *Ходжибергенов Д.Т.* Влияние режимов резания на поперечную усадку стружки при многолезвийной ротационной обработке // Техника машиностроения. – 2011. – № 1 (77). – С. 13–16.
9. *Клушин М.И.* Резание металлов: элементы теории пластического деформирования срезаемого слоя. – М.: Машгиз, 1956.
10. *Merchant M.E.* Mechanics of the metal cutting process//J. Appl. Phys. 1945. V. 16, N 5/6. P. 267–318.

Research of shearing angle at rotary treatment

D.T. Hodjibergenov

The article presents the results of research of shearing angle at rotary treatment, that give methodical opportunity to specify their interrelationships with other aspects of cutting condition, that determine the structural and temperature dependencies, and also the quality of the treated surface.

Key words: shearing angle, deformation degree, scheme of cutting, rotation of the cutting tool, rotary ways of treatment, kinematic coefficient, cut off layer.