

---

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

---

УДК 621.951.45  
DOI: 10.34641/TM.2023.247.1.001

Н. А. РАГРИН, д-р техн. наук

"Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б. Ельцина", г. Бишкек

А. А. АЙНАБЕКОВА, ст. преподаватель, У. М. ДЫЙКАНБАЕВА, ст. преподаватель

"Кыргызский ГТУ им. И. Раззакова", г. Бишкек

E-mail: n\_ragrin@mail.ru

## Разработка основ повышения качества отверстий обработанных стандартными спиральными сверлами

Представлены результаты исследований, позволившие разработать и обосновать условия обработки деталей из конструкционных углеродистых сталей стандартными спиральными сверлами из быстрорежущей стали позволяющие получить показатели качества отверстий соответствующие нормальному развертыванию, с целью значительного снижения трудоемкости обработки отверстий высокого качества за счет исключения нескольких технологических переходов после сверления. Разработана эмпирическая зависимость температуры резания от скорости резания при сверлении конструкционных сталей спиральными сверлами из быстрорежущей стали. Определено аналогичное влияние высоких и низких скоростей резания на пластичность и жесткость конструкционных сталей. Обоснована необходимость экспериментальных исследований влияния низких скоростей резания на качество просверленных отверстий. Обоснована необходимость применения стандартных сверл из быстрорежущих сталей класса точности А1 с двухплоскостной заточкой режущей части.

The results of research are presented, which made it possible to develop and justify the conditions for processing parts from structural carbon steels with standard twist drills made of high-speed steel, which allow obtaining hole quality indicators corresponding to normal reaming, in order to significantly reduce the labor intensity of processing high-quality holes by eliminating several technological transitions after drilling. An empirical dependence of the cutting temperature on the cutting speed when drilling structural steels with twist drills made of high-speed steel has been developed. A similar effect of high and low cutting speeds on the ductility and rigidity of structural steels has been determined. The necessity of experimental studies of the effect of low cutting speeds on the quality of drilled holes is substantiated. The necessity of using standard drills made of high-speed steels of accuracy class A1 with two-plane sharpening of the cutting part is substantiated.

**Ключевые слова:** спиральное сверло, отверстие, качество, конструкционная сталь, быстрорежущая сталь

**Key words:** twist drill, hole, quality, structural steel, high speed steel

## Анализ проблемы

Технологический процесс обработки деталей имеющих отверстия высокой точности и относительно небольшого диаметра включает несколько переходов обработки осевыми инструментами после сверления, количество которых зависит от конкретных требований к качеству отверстий.

В работе [1] представлены результаты анализа показателей качества отверстий деталей технологической оснастки, каждая из которых может иметь до десяти высокоточных отверстий (табл. 1).

Как видно в представленной табл. 1 показатели качества отверстий технологической оснастки достаточно высокие, для обеспечения которых необходима значительная трудоемкость обработки.

В табл. 2 представлены регламентированные справочником [2] показатели качества при обработке отверстий осевыми инструментами, приведены ориентировочные показатели качества для различных методов обработки осевыми инструментами полученные систематизацией непосредственных наблюдений в производственных условиях [2].

В представленной таблице видно, что сверлением могут быть получены отверстия, показатели качества которых соответствуют нормальному развертыванию, а именно  $Ra = 0,8$  мкм, глубина дефектного поверхностного слоя 15 мкм, квалитет допуска 9, технологический допуск на размер 43 мкм при номинальных диаметрах отверстий св. 10 до 18 мм. Такие показатели качества позволяют исключить большинство технологических переходов (табл. 2) и сразу после сверления выполнять точное и тонкое развертывание для обеспечения показателей качества, представленных в табл. 1. Однако справочник [2] не содержит информации об условиях обработки сверлением деталей из конструкционных углеродистых сталей, позволяющих получить такие высокие показатели качества отверстий.

На основании вышеизложенного определена цель исследований: разработать и обосновать условия обработки деталей из конструкционных углеродистых сталей стандартными спиральными сверлами из быстрорежущей стали, позволяющие получить показатели качества отверстий соответствующие нормальному развертыванию, с целью значительного

Таблица 1

| Диаметр отверстия, мм | Квалитет допуска | Шероховатость поверхности $Ra$ , мкм | Допуск перпендикулярности оси отверстий, $\perp$ мм | Назначение отверстия    |
|-----------------------|------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|
| 10—13                 | 7                | 0,8                                  | 0,02                                                | Под знаки               |
| 14—16                 | 9—7              | 0,8                                  | 0,02                                                | Под выталкиватели       |
| 16—20                 | 7                | 0,8                                  | 0,06—0,04                                           | Под направляющие втулки |

Таблица 2

| Обработка                 | Шероховатость поверхности $Ra$ , мкм | Глубина дефектного поверхностного слоя, мкм | Квалитет допуска | Технологические допуски (мкм) на размер при номинальных диаметрах отверстий Св. 10 до 18 мм |
|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сверление, рассверливание | 25—0,8                               | 70—15                                       | 13—9             | 270—43                                                                                      |
| Зенкерование черновое     | 25—6,3                               | 50—20                                       | 13—12            | 270—180                                                                                     |
| Зенкерование чистовое     | 25—0,4                               | 25—15                                       | 13—8             | 270—27                                                                                      |
| Развертывание нормальное  | 12,5—0,8                             | 25—15                                       | 11—10            | 110—70                                                                                      |
| Развертывание точное      | 6,3—0,4                              | 15—5                                        | 9—7              | 43—18                                                                                       |
| Развертывание тонкое      | 3,2—0,1                              | 10—5                                        | 6                | 11                                                                                          |

снижения трудоемкости обработки отверстий высокого качества за счет исключения нескольких технологических переходов обработки осевыми инструментами после сверления.

Общепризнанным технологическим методом повышения показателей качества при обработке резанием деталей из углеродистых конструкционных сталей является увеличение скорости резания. При этом шаг микронеровностей уменьшается. Температура резания, в основном зависящая от скорости резания, растет, увеличивается пластичность обрабатываемого материала и снижается его прочность, в результате чего высота микронеровностей также уменьшается. Снижение прочности и увеличение пластичности обрабатываемого материала приводит к уменьшению влияния наследственного фактора — степени воздействия погрешностей размера и формы обрабатываемой поверхности на обработанную поверхность, что способствует повышению точности размера обработанной поверхности. Однако общепризнанный технологический метод повышения показателей качества при обработке резанием, ограничен сравнительно невысокой теплостойкостью быстрорежущих сталей (650 °С) из которых изготавливаются стандартные спиральные сверла [3], поэтому в полной мере может быть применим только для твердых сплавов, а также неметаллических инструментальных материалов.

Вместе с тем, увеличение скорости резания связано с увеличением частоты вращения шпинделя станка и приводит к значительному увеличению разбивки просверленных отверстий, как показано на рис. 1 [1].

Разбивка  $\Delta$  фактически является качеством допуска обработанного отверстия, т.к. определяется разностью между рабочим диаметром сверла и диаметром просверленного отверстия. В приведенном примере (рис. 1) разбивка отверстий происходит в результате увеличения колебаний рабочей части сверла при увеличении частоты вращения шпинделя станка по причине несимметричности кон-

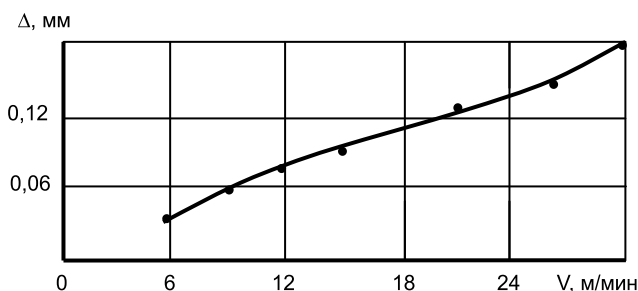


Рис. 1. Зависимость разбивки отверстия  $\Delta$  от скорости резания  $V$  при сверлении спиральными сверлами из быстрорежущей стали диаметром 10,2 мм

руктивных элементов и сердцевин сверл относительно продольной оси. Поэтому общепринятый технологический метод для стандартных спиральных сверл из быстрорежущей стали не приемлем.

При построении зависимости, представленной на рис. 1, испытывались стандартные спиральные сверла из стали Р6М5 класса точности А1, у которых осевое биение режущих кромок не превышало значения 0,06 мм. На рис. 1 видно, что на скорости резания 6 м/мин разбивка обработанных отверстий составила 0,04 мм, что соответствует 9 качеству допуска этого диаметра (табл. 2).

Аппроксимация графика представленного на рис. 1 позволила получить математическое выражение в виде

$$\Delta = 0,0063V^{0,99}, \quad (1)$$

с достаточно высокой точностью отражающее графическую зависимость (рис. 1). Рассчитанная по формуле (1) разбивка отверстия при скорости резания 4 м/мин равна 0,025 мм, что соответствует 8 качеству допуска (табл. 2).

Вместе с тем, при протягивании протяжками из быстрорежущей стали деталей из углеродистых конструкционных сталей, справочник [4] рекомендует скорости резания 6—3 м/мин обеспечивающие шероховатость обработанной поверхности  $Ra = 0,8$  мкм и точность 8—9-го качества, что соответствует нормальному разворачиванию (табл. 2). Рекомендуемые скорости резания при протягивании значи-

тельно ниже скоростей резания рекомендуемых справочником [4], при сверлении спиральными сверлами из быстрорежущих сталей деталей из углеродистых конструкционных сталей (для диаметра сверл 10 мм скорость резания рассчитанная по рекомендации справочника [4], равна 26 м/мин).

### Выбор и обоснование скорости резания для проведения исследований

На скоростях резания рекомендуемых при сверлении [4], на режущих лезвиях сверл наблюдается активное образование нароста, что значительно снижает качество обработанных отверстий. Известно, что нарост име-

ет максимальную высоту на скоростях резания 15—30 м/мин и полностью исчезает на скоростях резания больших 80 м/мин [3]. Диапазон скоростей резания максимальной высоты нароста соответствует рекомендуемым скоростям резания при сверлении [4]. Нарост не постоянен по времени и величине. Отделившиеся частицы нароста царапают обработанную поверхность и привариваются к ней, поэтому на скоростях резания активного образования нароста не может быть высокого качества обработанной поверхности. Из этого можно сделать вывод, что высокое качество обработанной поверхности, указывает на отсутствие нароста. То есть высокое качество обработанной поверхности при протягивании указывает на отсутствие нароста на скоростях резания меньших 6 м/мин.

В работе [3] приводятся результаты исследований образования нароста при токарной обработке конструкционных углеродистых сталей, на основании которых сделан вывод об отсутствии нароста при работе на низких скоростях резания. Однако результаты исследований характера образования нароста на режущих кромках быстрорежущих спиральных сверл отсутствуют. Это послужило основанием для проведения исследований [5]. Точились заготовки из стали 45 уголком спирального сверла, закрепленным в резцедержателе токарного станка (рис. 2). Измерение высоты нароста осуществлялось непосредственно на станке без съема инструмента с применением оптического приспособления (рис. 3).

На рис. 4 приведена фотография нароста на уголке сверла.

Получена зависимость высоты нароста от скорости резания (рис. 5), на скоростях резания 3,4 м/мин и меньших нарост отсутствует.

Экспериментально установлено, что при наиболее распространенных условиях резания сталей нарост имеет максимальную высоту при таком значении скорости резания, при котором температура резания равна 300 °С, и исчезает при значении скорости резания, при

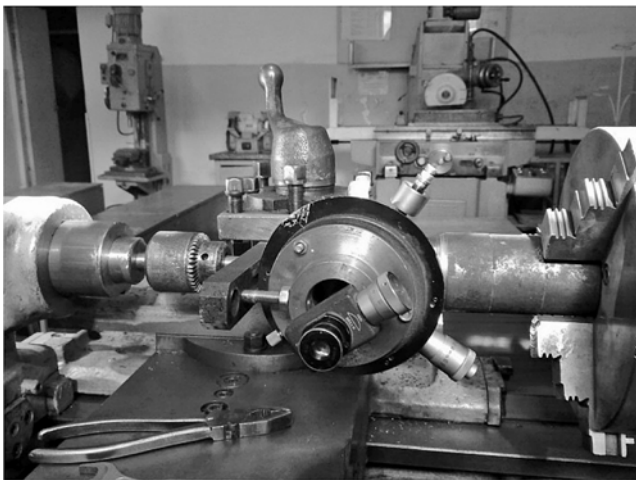


Рис. 2. Экспериментальный стенд



Рис. 3. Оптическое приспособление

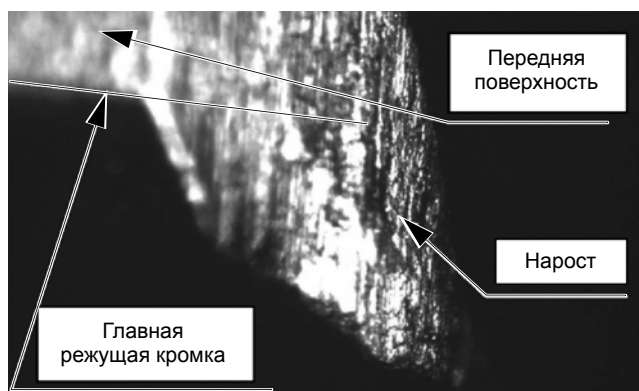


Рис. 4. Нарост на уголке сверла

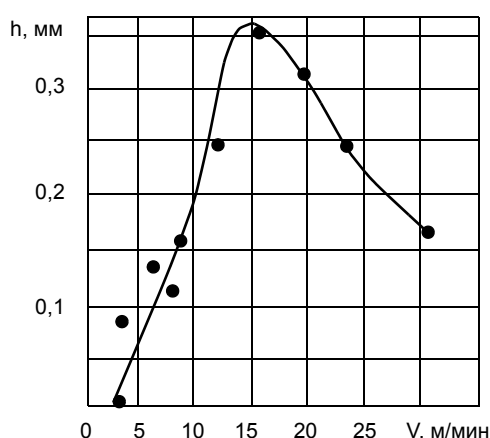


Рис. 5. Зависимость высоты нароста на уголках сверла от скорости резания

которой температура резания равна 600 °С [6]. С целью определения скорости резания, при которой нарост на уголке сверла имеет максимальную величину, проведена аппроксимация вершины и правой части кривой графика зависимости высоты нароста от скорости резания, (рис. 5). Методика аппроксимации вершины кривой графика представлена в работе [7]. Правая часть графика (рис. 5) аппроксимировалась методом наименьших квадратов уравнением прямой. В результате аппроксимации получены зависимости:

$$h = 9,84 \cdot 10^{-6} V^{5,714} e^{-0,338V}, \quad (2)$$

$$h = 0,5532 - 0,0127V. \quad (3)$$

Погрешность расчетов по зависимостям (2) и (3) показана в табл. 3.

В табл. 3 видно, что средняя погрешность расчетов по зависимости (2) составила 0,037 %, что позволяет с высокой степенью точности определить скорость резания, при которой нарост на уголке сверла имеет максимальную величину из отношения показателей степенной зависимости (2) [7]  $V_{hm} = 5,714/0,338 = 16,9$  м/мин.

Средняя погрешность расчетов по зависимости (3) имеет большую величину. Для сравнения проведена аппроксимация степенной и экспоненциальной зависимостями, имеющими вид:

$$h = 4,475V^{-0,92}, \quad (4)$$

$$h = 1,03e^{-0,06V}, \quad (5)$$

средняя погрешность расчетов которыми составила, для степенной зависимости (4)  $\Delta_{\text{ср.}} = 7$  %, для экспоненциальной зависимости (5)  $\Delta_{\text{ср.}} = 6,3$  %. Сравнительный анализ показывает, что линейная зависимость имеет значительно меньшую погрешность расчетов. Поэтому для определения максимальной скорости резания, при которой нарост исчезает [6] следует использовать зависимость (3), следующим образом  $0 = 0,5532 - 0,0127V_{\text{max}}$ . Максимальная скорость резания  $V_{\text{max}} = 43,56$  м/мин. Выше проведенный анализ позволил определить скорость резания  $V_{hm} = 16,9$  м/мин, при которой температура резания при сверлении конструкционных сталей равна 300 °С и скорость резания  $V_{\text{max}} = 43,56$  м/мин при которой температура резания при сверлении конструк-

Таблица 3

|                                       |      |      |      |      |      |                               |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|-------------------------------|
| Скорость резания, V, м/мин            | 12   | 16   | 20   | 23   | 31   |                               |
| Высота нароста h, мм                  | 0,25 | 0,35 | 0,31 | 0,25 | 0,16 |                               |
| Погрешность расчетов $\Delta$ , % (2) | 0,04 | 0,03 | 0,04 |      |      | $\Delta_{\text{ср.}} = 0,037$ |
| Погрешность расчетов $\Delta$ , % (3) | 0    | 3,2  | 4    | 0,6  |      | $\Delta_{\text{ср.}} = 1,95$  |

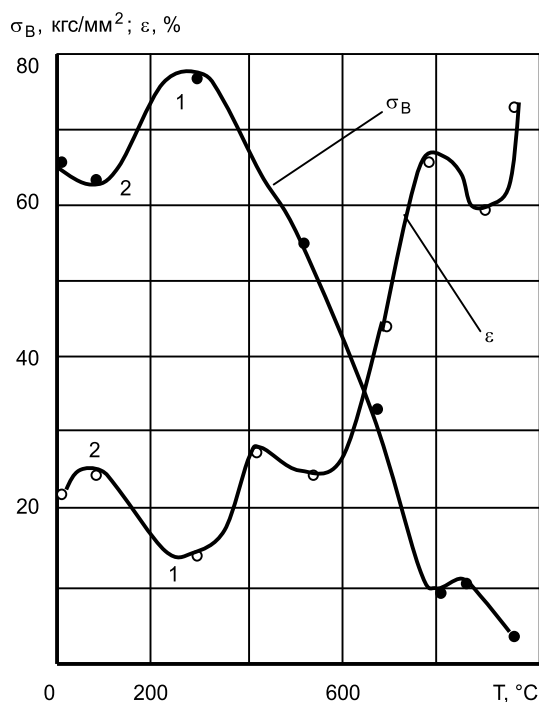


Рис. 6. Зависимость прочности и пластичности углеродистой конструкционной стали от температуры, где  $\varepsilon$  — степень деформации, характеризующая пластичность материала,  $\sigma_B$  — предел прочности

ционных сталей равна 600 °C. В результате несложных математических действий получена зависимость

$$\Theta = 37,824V^{0,7328} \quad (6)$$

погрешность расчета которой на скорости  $V_{hm} = 16,9$  м/мин составила 0,1 %, а на скорости  $V_{max} = 43,56$  м/мин составила 0,17 %. Это позволяет использовать зависимость (6) для определения температуры резания на минимальной скорости резания  $V_{min} = 3,4$  м/мин на которой наrost отсутствовал. Рассчитанная по зависимости (6) температура резания на скорости резания  $V_{min} = 3,4$  м/мин равна 92,7 °C.

Как было отмечено ранее, общепризнанным технологическим методом повышения показателей качества при обработке резанием деталей из углеродистых конструкционных сталей, является увеличение скорости резания. Температура резания, в основном зависящая от скорости резания, при этом растет, за счет

чего увеличивается пластичность обрабатываемого материала и снижается его прочность, в результате высота микронеровностей уменьшается. Обоснована невозможность применения общепризнанного технологического метода при обработке сталей стандартными спиральными сверлами из быстрорежущих сталей. Наряду с тем, в работе [8] приведена эмпирическая зависимость пластичности и прочности стали от температуры, показывающая увеличение пластичности и снижение прочности при снижении температуры в пределах 100 °C (рис. 6).

Из представленной зависимости (рис. 6) следует аналогичное воздействие низких и высоких скоростей резания на пластичность и жесткость конструкционных сталей. Это является основанием для проведения исследований качества отверстий просверленных на скоростях резания меньших 6 м/мин.

Однако помимо скорости резания и температуры, на качество обработанной поверхности существенное влияние оказывает качество инструмента. Стандарты [9—11] регламентируют 3 класса точности сверл: А1, В1 и В по мере убывания степени точности их изготовления и заточки.

### Закономерности влияния погрешности изготовления и заточки сверл на качество просверленных отверстий

К погрешностям изготовления сверл можно отнести погрешности размеров конструктивных элементов: ширина пера  $B$ , ширина ленточки  $f$ , сердцевина сверла  $K$  [9]. Различие размеров зубьев сверл в части ширин перьев и ленточек, а также несимметричность сердцевины, приводит к увеличению разбивки просверленных отверстий с увеличением частоты вращения сверла (рис. 1).

Погрешности заточки сверл, выраженные в биении режущих кромок, отрицательно влияют на качество просверленных отверстий независимо от частоты вращения сверла, в силу того, что от биения режущих кромок зависит толщину

на срезаемого слоя каждым зубом сверла — подача на оборот сверла. Стандарт [10] регламентирует проверять симметричность расположения режущих кромок относительно оси рабочей части сверла (допуск биения) посередине режущих кромок сверла в направлении, перпендикулярном режущей кромке. Допуск биения не должен превышать указанного в табл. 4.

В табл. 4 приведено осевое биение режущих кромок, величина которого зависит от угла  $\varphi$  равного  $59^\circ$  [9].

На рис. 7—9 показаны результаты анализа видов погрешностей заточки сверл [12], которыми являются: несимметричность режущих лезвий в результате смещения поперечной кромки сверла рис. 7; несимметричность режущих лезвий в результате неравенства углов  $\varphi$  рис. 8; несимметричность режущих лезвий в результате обеих вместе взятых погрешностей заточки рис. 9.

В табл. 5 приведены регламентированные справочником [4] подачи на оборот сверла

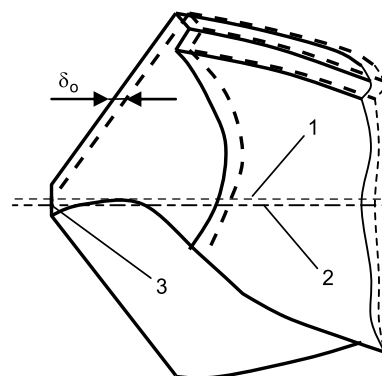


Рис. 7. Смещение поперечной кромки

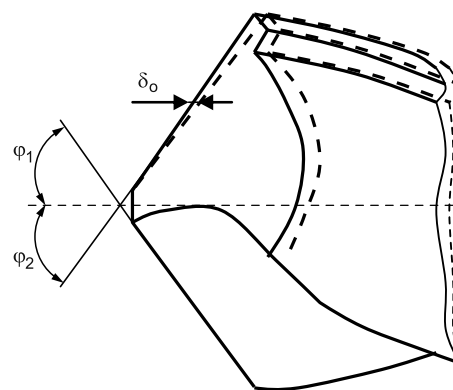


Рис. 8. Неравенство углов  $\varphi$

Таблица 4

| Диаметр сверла, мм | Допуск биения для сверл классов точности, мм ГОСТ 2034-80 |      |      | Осевое биение сверл классов точности $\delta_o$ , мм |       |      |
|--------------------|-----------------------------------------------------------|------|------|------------------------------------------------------|-------|------|
|                    | A1                                                        | B1   | B    | A1                                                   | B1    | B    |
| До 3               | 0,03                                                      | 0,05 | 0,10 | 0,035                                                | 0,058 | 0,12 |
| Св. 3 до 6         | 0,05                                                      | 0,10 | 0,13 | 0,058                                                | 0,12  | 0,15 |
| " 6 " 10           | 0,07                                                      | 0,13 | 0,18 | 0,08                                                 | 0,15  | 0,21 |
| " 10 " 20          | 0,11                                                      | 0,20 | 0,30 | 0,13                                                 | 0,23  | 0,35 |
| " 20 " 30          | 0,15                                                      | 0,30 | 0,40 | 0,175                                                | 0,35  | 0,47 |
| " 30 " 40          | —                                                         | 0,40 | 0,50 | —                                                    | 0,47  | 0,58 |
| " 40 " 50          | —                                                         | 0,50 | 0,60 | —                                                    | 0,58  | 0,7  |
| " 50               | —                                                         | 0,90 | 1,00 | —                                                    | 1,05  | 1,2  |

Таблица 5

|             |           |           |           |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| $d$ , мм    | 10—12     | 12—16     | 16—20     |
| $S$ , мм/об | 0,25—0,28 | 0,28—0,33 | 0,33—0,38 |

при сверлении углеродистой конструкционной стали твердостью 160—240 НВ спиральными сверлами из быстрорежущей стали.

Из табл. 4 и 5 видно, что допуск биения для класса точности B1 и B для сверл диаметром от 10 до 20 мм допускает осевое биение по середине режущих кромок в пределах подачи на оборот сверла, в этом случае сверла будут работать практически одним зубом. Для сверл класса точности A1 допуск осевого биения по середине режущих кромок равен половине подачи на оборот сверла. Однако на уголке сверла величина допуска осевого биения удвоится и также будет равна величине подачи на оборот сверла.

Осевое биение режущих кромок приведет к неравномерному распределению осевой силы и момента резания между зубьями сверл, отклонению оси сверла, изгибу его рабочей час-

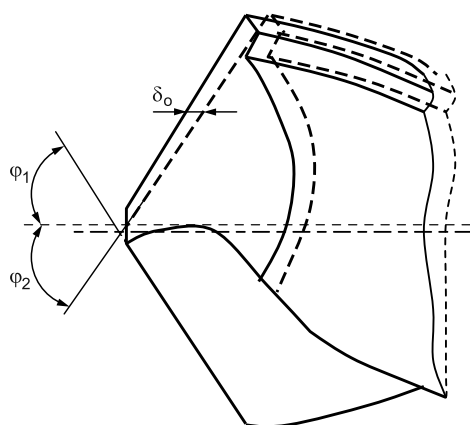


Рис. 9. Смещение поперечной кромки и неравенство углов  $\varphi$

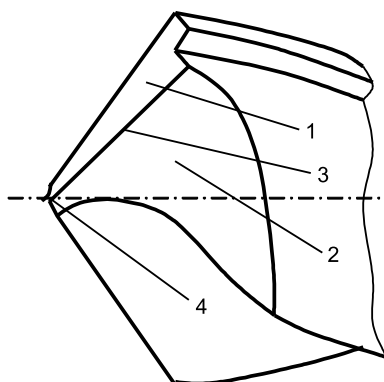


Рис. 10. Двухплоскостная заточка

ти, увеличению разбивки просверленного отверстия и неперпендикулярности его оси.

Авторами работы [12] предложено использовать двухплоскостную заточку сверл (рис. 10), позволяющую значительно уменьшить погрешности заточки.

Плоскость 1 (рис. 10) затачивается под рабочим углом ( $\alpha = 12^\circ$ ) [9], плоскость 2 под большим углом. Погрешности заточки исключаются, если ребро 3 пересечения плоскостей 1 и 2 каждого зуба сверла пересекается с поперечной кромкой на оси сверла. При этом поперечная кромка 4 является ломаной линией с вершиной на оси сверла и при врезании выполняет центровочную функцию, что исключает необходимость зацентровки отверстия перед сверлением.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана эмпирическая зависимость температуры резания от скорости резания при сверлении конструкционных сталей спиральными сверлами из быстрорежущей стали.

2. Обоснована необходимость проведения исследований качества отверстий обработанных спиральными сверлами из быстрорежущих сталей на скоростях резания меньших 6 м/мин.

3. Обоснована необходимость применения стандартных спиральных сверл из быстрорежущих сталей класса точности А1 с двухплоскостной заточкой режущей части.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рагрин Н. А., Айнабекова А. А., Озгонбеков А. О. Разработка путей и методов повышения качества отверстий при сверлении // Технология машиностроения. 2018. № 6. С. 10—15.
2. Дальский А. М., Косилова А. Г., Мещеряков Р. К., Суслов А. Г. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 — 5-е изд. / М.: Машиностроение-1, 2001. 912 с.
3. Рагрин Н. А. Обработка материалов и инструменты: Учебник / Бишкек: Текник, 2012. 156 с.
4. Дальский А. М., Косилова А. Г., Мещеряков Р. К. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2. 5-е изд. / М.: Машиностроение-1, 2001. 944 с.
5. Рагрин Н. А., Айнабекова А. А., Нарыжный С. В. Влияние скорости резания на наличие и высоту нароста при сверлении быстрорежущими спиральными сверлами // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2013. № 29. С. 158—160.
6. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
7. Рагрин Н. А. Математическая модель стойкостной зависимости при сверлении // Технология машиностроения. 2014. № 1. С. 49—54.
8. Рагрин Н. А., Дыйканбаева У. М., Айнабекова А. А., Курганова Д. М. Научные основы упрочнения поверхностного слоя просверленных отверстий // Технология машиностроения. 2022. № 12. С. 21—26.
9. ГОСТ 4010—77 Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком.
10. ГОСТ 2034—80 Сверла спиральные. Технические условия.
11. ГОСТ 10903—77 Сверла спиральные с коническим хвостовиком.
12. Рагрин Н. А., Самсонов В. А., Айнабекова А. А. Определение закономерностей влияния погрешностей заточки спиральных сверл на их стойкость // Технология машиностроения. 2015. № 7. С. 27—31.