

УДК 621.951.45
DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-8-63-71

**РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ
ДЕФЕКТНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОТВЕРСТИЙ,
ПРОСВЕРЛЕННЫХ СПИРАЛЬНЫМИ СВЕРЛАМИ**

Н.А. Рагрин, У.М. Дыйканбаева

Аннотация. Проведен анализ проблемы снижения глубины дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных спиральными сверлами. Детали технологической оснастки имеют большое количество отверстий высокой точности и относительно небольшого диаметра. Обработка таких отверстий содержит семь переходов осевыми инструментами, первыми из которых всегда являются спиральные сверла. Следующие за сверлами осевые инструменты повышают качество поверхности и точность отверстий, и снижают глубину дефектного поверхностного слоя, от которого также зависит и стойкость этих инструментов. Получена зависимость для расчета равнодействующей радиальной силы при сверлении, разработана физическая модель, отражающая физические закономерности формирования дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных спиральными сверлами и характер влияния условий обработки сверлением на глубину дефектного поверхностного слоя.

Ключевые слова: отверстие; сверло; сила резания; подача; сверление; глубина дефектного поверхностного слоя.

**СПИРАЛЬ ТҮРҮНДӨГҮ БУРГУ МЕНЕН
БУРГУЛАНГАН ТЕШИКТЕРДИН БУЗУЛГАН БЕТТИК КАТМАРЫН
ТҮЗҮҮНҮН ФИЗИКАЛЫК МОДЕЛИН ИШТЕП ЧЫГУУ**

Н.А. Рагрин, У.М. Дыйканбаева

Аннотация. Спираль түрүндөгү бургулар менен бургуланган тешиктердин бузулган беттик катмарынын тереңдигин азайтуу маселесине талдоо жүргүзүлөт. Технологиялык шаймандардын бөлүктөрү жогорку тактыктагы жана салыштырмалуу кичинекей диаметрдеги көп сандаган тешиктерге ээ. Мындай тешиктерди иштетүү октук аспаптар менен жети жолу өтүүнү камтыйт, алардын биринчиси ар дайым бурма бургу болуп саналат. Бургулоодон кийинки октук аспаптар беттин сапатын жана тешиктердин тактыгын жакшыртат, ошондой эле аспаптын иштөө мөөнөтүнө таасир этүүчү бузулган беттик катмардын тереңдигин азайтат. Бургулоонун натыйжасында радиалдык күчтү эсептөө үчүн көз карандылык алынган, спираль түрүндөгү бургулар менен бургуланган тешиктердин бузулган беттик катмарынын пайда болушунун физикалык мыйзам ченемдүүлүктөрүн жана бузулган беттик катмардын тереңдигине бургулоону иштетүү шарттарынын таасиринин мүнөзүн чагылдырган физикалык модель иштелип чыккан.

Түйүндү сөздөр: тешик; бургу; кесүү күчү; берүү; бургулоо; бузулган беттик катмардын тереңдиги.

**DEVELOPMENT OF A PHYSICAL MODEL
OF THE FORMATION OF A DEFECTIVE SURFACE LAYER
OF HOLES DRILLED BY TWIST DRILLS**

N.A. Ragrin, U.M. Dyikanbaeva

Abstract. The analysis of the problem of reducing the depth of the defective surface layer of holes drilled with spiral drills is carried out. The parts of the tooling have a large number of holes of high precision and relatively small diameter.

The processing of such holes contains seven transitions with axial tools, the first of which is always spiral drills. The axial tools following the drills improve the surface quality and the accuracy of the holes, and reduce the depth of the defective surface layer, on which the durability of these tools also depends. The dependence for calculating the resultant radial force during drilling is obtained, a physical model is developed that reflects the physical patterns of the formation of a defective surface layer of holes drilled by spiral drills and the nature of the influence of drilling conditions on the depth of the defective surface layer.

Keywords: hole; drill; cutting force; feed; drilling; depth of defective surface layer.

Введение. Большое количество деталей технологической оснастки имеют отверстия высокой точности и относительно малого диаметра, от которых зависит качество и долговечность технологической оснастки, а значит и себестоимость изготавливаемых изделий. Технологический процесс получения точных отверстий относительно малого диаметра содержит семь переходов обработки осевыми инструментами, первым из которых всегда является сверление. Следующие за сверлением технологические переходы повышают качество отверстий снижением технологического допуска на размер и шероховатости поверхности отверстий, а также снижением глубины дефектного поверхностного слоя от 70 мкм после сверления до 5 мкм после тонкого развертывания. Глубина дефектного поверхностного слоя является одним из важнейших показателей качества отверстий, так как от нее зависит не только качество отверстий, но и стойкость следующих за сверлами осевых инструментов, что в значительной степени влияет на качество и себестоимость изготавливаемых изделий. Поэтому решение проблемы снижения глубины дефектного поверхностного слоя отверстий, обработанных сверлением с целью повышения качества и снижения себестоимости деталей машиностроения, является актуальной задачей.

Анализ проблемы. Глубина резания при сверлении определяется половиной диаметра сверла. Поэтому процесс резания при сверлении происходит в результате действия значительных сил резания на лезвиях спиральных сверл (рисунок 1), приводящих к изменению физико-механических свойств обработанной поверхности и поверхностного слоя.

Глубина дефектного поверхностного слоя и его физико-механические свойства, выраженные в виде дефектов кристаллической структуры и плотности упаковки атомов, зависят от радиальной силы P_y . Существующие справочники по обработке деталей резанием не содержат информации по учету силы P_y при сверлении, формулы для ее расчета отсутствуют.

Автор работы [1] на основании экспериментальных исследований приводит соотношение между составляющими сил резания при точении резцами с углом $\varphi = 45^\circ$, углом $\lambda = 0^\circ$ и углом $\gamma = 15^\circ$ при отношении глубины резания к подаче, превышающем 10 раз: $P_z:P_y:P_x = 1,5:0,3$, что позволяет получить соотношение сил резания $P_y:P_x = 1,65$. Известно, что отношение $P_y:P_x$ при неизменной глубине резания зависит от угла в плане φ . В таблице 1 приведена относительная величина осевой силы P_o при различных углах φ при сверлении стали средней твердости [2].

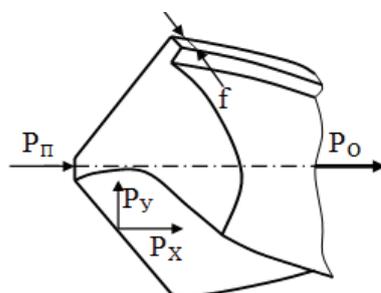


Рисунок 1 – Составляющие силы резания спирального сверла:
 P_o – осевая сила; P_{II} – осевая сила поперечного лезвия;
 P_o – осевая сила главного лезвия; P_y – радиальная сила главного лезвия

Таблица 1 – Относительная величина P_o при различных углах φ

Значение угла φ		
45°	60°	75°
Относительная величина P_o		
0,97	1	1,04

Данные таблицы 1 показывают, что при увеличении угла φ от 45° до 60° относительная величина P_o увеличивается, что соответственно приводит к уменьшению отношения $P_y:P_x$ следующим образом: $1,65 \times 0,97 = 1,6$.

При обработке сверлением формула для расчета осевой силы имеет вид (1) [3]:

$$P_o = 10C_p D^q S^y K_p, \text{ Н.} \quad (1)$$

Значение коэффициента C_p и K_p и показателей степеней формулы (1) приведены в таблице 2 [3].

Таблица 2 – Коэффициенты и показатели степеней формулы (1)

C_p	q	y	K_p
68	1,0	0,7	0,75

Для сверл диаметром 11 мм осевая сила, рассчитанная по формуле (1) при рекомендуемой подаче $S = 0,25$ мм/об [3], равна $P_o = 2126$ Н (212,6 кгс). Осевая сила при сверлении складывается из трех составляющих сил резания: $P_o = P_{\Pi} + 2P_x$ (рисунок 1). Доля осевой силы поперечного лезвия P_{Π} в осевой силе составляет 60 % [4]. Тогда суммарная осевая сила главных лезвий составит $2P_x = 850$ Н (85 кгс). С учетом соотношения $P_y:P_x = 1,6$ радиальная сила одного главного лезвия будет равна: $P_y = 680$ Н (68 кгс).

В результате приведенного выше анализа был определен коэффициент $C_{py} = 21,75$, при использовании которого и зависимости (1) получена зависимость (2) для расчета радиальной силы на главных лезвиях при сверлении:

$$P_y = C_{py} D^q S^y K_p, \text{ кгс.} \quad (2)$$

Силы P_x действующие на обоих главных лезвиях сверла и направленные навстречу друг другу, теоретически должны уравниваться. Однако вследствие погрешности заточки сверл (неодинаковой величины углов φ , длин главных режущих кромок, смещения поперечной кромки) силы P_y не равны, поэтому появляется равнодействующая радиальная сила [1].

Каждый зуб спирального сверла имеет три режущих кромки, участвующие в формировании отверстия в сплошном материале: поперечная кромка, главная режущая кромка и вспомогательная кромка ленточки на участке, равном половине подачи на оборот сверла. Непосредственное воздействие на обработанную поверхность оказывают вспомогательные лезвия ленточек. Задние поверхности вспомогательных лезвий ленточек находятся в сплошном контакте с обработанной поверхностью из-за отсутствия задних углов на участках вспомогательных задних поверхностей равных ширине ленточки f (рисунок 1). Процесс резания при отсутствии задних углов невозможен, поэтому вспомогательные кромки ленточек не режут, а деформируют (сминают) обработанную поверхность, оказывая воздействие на нее с силой ΔP_y . Поэтому равнодействующая радиальная сила ΔP_y непосредственно участвует в формировании дефектного поверхностного слоя просверленных отверстий.

На основании анализа проблемы и в соответствии с целью исследований были определены задачи исследований:

1. Разработать зависимость для расчета равнодействующей радиальной силы.

2. Разработать физическую модель, отражающую физические закономерности формирования дефектного поверхностного слоя просверленных отверстий и характер влияния условий обработки сверлением на глубину дефектного поверхностного слоя.

Результаты исследований. Результаты анализа показали, что основной причиной возникновения равнодействующей радиальной силы ΔP_y являются погрешности заточки спиральных сверл. Основные причины возникновения погрешностей заточки происходят в результате неравенства углов φ и смещения поперечной кромки, как показано на рисунке 2. Неравенство углов φ также приводит к неравенству длин главных режущих кромок.

Стандарт [5] регламентирует допуск биения, проверяемый посередине режущих кромок сверла относительно оси рабочей части сверла в направлении, перпендикулярном режущей кромке (рисунок 2, вид А, сторона вс треугольника авс). Однако основное влияние на осевую силу оказывает осевое биение режущих кромок, от которого непосредственно зависит неравенство величины подачи на зубьях сверла. Регламентированные стандартом [5] допуски биения сверл диаметром 11 мм и допуски осевого биения сверл этого диаметра (рисунок 2, вид А, сторона ас = δ_o треугольника авс) представлены в таблице 3.

Данные таблицы 3 показывают, что допуск осевого биения сверл класса точности В1 практически равен рекомендуемой подаче на оборот сверла [3], а допуск осевого биения сверл класса точности В значительно превышает величину рекомендуемой подачи. В этом случае в формировании обработанной поверхности будет участвовать только один зуб сверла с равнодействующей радиальной силой $\Delta P_y = 68$ кгс.

С использованием зависимости (2) и результатов анализа проблемы, разработана зависимость, позволяющая рассчитать равнодействующую радиальную силу:

$$\Delta P_y = \frac{\delta_o}{S} P_y = C_{py} \delta_o D S^{-0,3} K_p, \text{ кгс.} \quad (3)$$

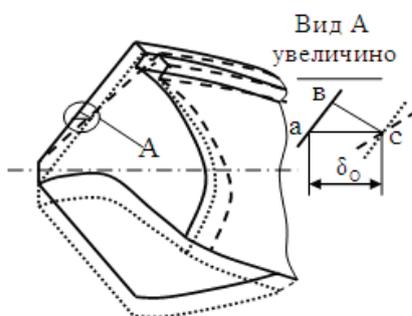


Рисунок 2 – Погрешности заточки сверл в результате смещения:
 – поперечной кромки; - - - - - – неравенства углов φ

Таблица 3 – Допуски биения и осевого биения сверл диаметром 11 мм

Допуск биения сверл классов точности		
А1	В1	В
0,11	0,2	0,3
Допуск осевого биения δ_o сверл классов точности		
А1	В1	В
0,14	0,23	0,35

В том случае, если осевое биение режущих кромок превышает величину подачи, то равнодействующая сила $\Delta P_y = P_y$.

В работе [6] приведены результаты испытаний сверл диаметром 11 мм класса точности В с осевым биением 0,3 мм (таблица 4) и класса точности А1 с осевым биением 0,06 мм с двухплоскостной заточкой задних поверхностей (таблица 5).

Среднее значение глубины дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных сверлами класса точности В (таблица 4), составляет 54,3 мкм, тогда как среднее значение глубины дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных сверлами класса точности А1 (таблица 5), равно 17,1 мкм.

У сверл класса точности А1 при максимальной подаче, равной 0,25 мм/об равнодействующая сила, рассчитанная по формуле (3), составит $\Delta P_y = 16,32$ кгс, т. е. в 4,2 раза меньше, чем у сверл класса точности В. При этом среднее значение глубины дефектного слоя в таблице 5 в 3,2 раза меньше, чем в таблице 4 (17,1 мкм и 54,3 мкм, соответственно). Это означает, что уменьшение глубины дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных сверлами класса точности А1, по сравнению с отверстиями, просверленными сверлами класса точности В, не прямо пропорционально уменьшению равнодействующей силы. Равнодействующая сила, помимо осевого биения режущих кромок, зависит от подачи (3), поэтому основной причиной отсутствия прямой пропорции между уменьшением равнодействующей силы и уменьшением средней глубины дефектного поверхностного слоя может быть наличие функциональной зависимости между глубиной дефектного поверхностного слоя и подачей у сверл класса точности А1 (таблица 5), при отсутствии такой зависимости у сверл класса точности В (таблица 4). Это подтверждается результатом корреляционного анализа взаимосвязи между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя, представленного в таблице 6.

Значимый коэффициент корреляции предполагает наличие прямой функциональной зависимости глубины дефектного поверхностного слоя от подачи отверстий, просверленных сверлами класса точности А1. Характер этой зависимости представлен графиками на рисунке 3 [6], из которого видно, что глубина дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных сверлами класса точности А1, имеет прямую зависимость от подачи, что оказывает влияние на среднее значение глубины дефектного поверхностного слоя. При этом также видно, что характер зависимости меняется с увеличением подачи, угол наклона кривой графика к оси абсцисс уменьшается.

В таблице 7 представлены рассчитанные по зависимостям (2) и (3) радиальные силы и равнодействующие радиальные силы при сверлении сверлами класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм.

На рисунке 4 приведены графики зависимостей, представленных в таблице 7. На рисунке видно, что осевая сила равномерно возрастает с увеличением подачи, тогда как интенсивность снижения равнодействующей радиальной силы уменьшается с увеличением подачи. Этим можно объяснить снижение интенсивности увеличения глубины дефектного поверхностного слоя при увеличении подачи (рисунок 3).

Скорость резания не влияет на силы резания при сверлении [1–4]. Однако в работе [7] приведена эмпирическая зависимость глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания при сверлении сверлами класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм, представленная на рисунке 5, из которого видно, что глубина дефектного поверхностного слоя имеет обратную зависимость от скорости резания, с увеличением скорости резания глубина дефектного поверхностного слоя уменьшается.

Автор работ [6, 7] показал, что скорость резания имеет прямое и существенное влияние на разбивку отверстий. Такое влияние является результатом увеличения колебаний рабочей части сверла с увеличением частоты вращения шпинделя станка, в результате различного расстояния от центров масс конструктивных элементов рабочей части сверла до его оси в пределах допусков на размеры этих конструктивных элементов.

Таблица 4 – Глубина дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных сверлами с осевым биением 0,3 мм

V, м/мин \ S, мм/об	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	δ, мкм					
2,18					66,7	49,6
2,76				58,3	56,6	55,6
3,45			51,6	56,7	53,3	50,0
4,32		53,3	53,3	63,4	63,3	46,6
5,53	50,0	43,4	53,3	50,0	58,4	53,3

Таблица 5 – Глубина дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных сверлами с осевым биением 0,06 мм

V, м/мин \ S, мм/об	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	δ, мкм					
2,18					25	25
2,76				22,30	23,0	22,30
3,45			16,00	21,30	21,00	22,60
4,32		15,30	18,60	19,00	16,66	21,00
5,53	13,33	15,00	18,00	18,66	18,93	19,00

Таблица 6 – Коэффициент корреляции r между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя

V, м/мин	Сверла класса точности В		Сверла класса точности А1	
	r		r	
4,32	-0,168	Незначим	0,890	Значим
5,53	0,616	Незначим	0,876	Значим

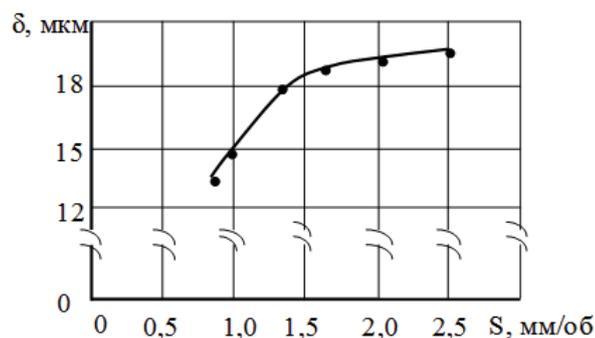


Рисунок 3 – Зависимость глубины дефектного поверхностного слоя от подачи сверл класса точности А1, скорость резания $V = 5,53$ м/мин

Таблица 7 – Радиальная сила и равнодействующая радиальная сила, сверла класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм

S , мм/об	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
P_y , кгс	30,1	35,8	43	49,8	58	68
ΔP_y , кгс	23,1	21,5	19,8	18,6	17,4	16,32

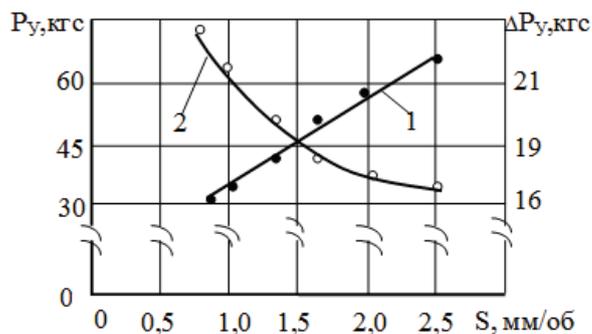


Рисунок 4 – Зависимость радиальной силы (1) и равнодействующей радиальной силы (2) от подачи, сверла класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм

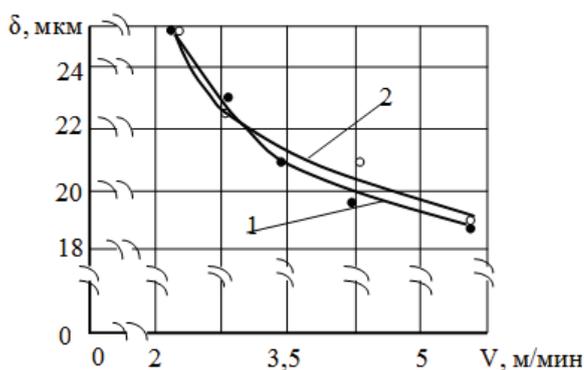


Рисунок 5 – Зависимости глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания: 1 – $S = 0,25$ мм/об; 2 – $S = 0,2$ мм/об, сверла класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм

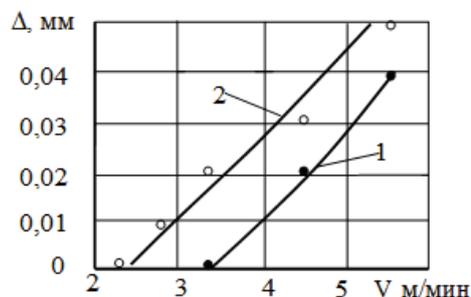


Рисунок 6 – Зависимость разбивки отверстий от скорости резания: 1 – $S = 0,2$ мм/об; 2 – $S = 0,25$ мм/об, сверла класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм

На рисунке 6 приведены зависимости разбивки отверстий, просверленных сверлами класса точности А1, с осевым биением режущих кромок 0,06 мм от скорости резания [7], где видно, что существуют скорости резания, на которых разбивка отверстий отсутствует. В этом случае вспомогательные задние поверхности ленточек находятся в полном контакте с обработанной поверхностью, в результате чего глубина дефектного поверхностного слоя максимальная (рисунок 5). С увеличением скорости резания разбивка отверстий увеличивается (рисунок 6), при этом площадки контакта ленточек с обработанной поверхностью отверстий уменьшаются, уменьшается степень их воздействия на обработанную поверхность и глубина дефектного поверхностного слоя (рисунок 5).

Разбивка отверстий также имеет прямую зависимость от подачи. С увеличением подачи разбивка отверстий увеличивается в результате изгиба рабочей части сверла при увеличении осевой силы. На рисунке 6 видно, что увеличение подачи не оказывает существенного влияния на интенсивность разбивки отверстий, угол наклона кривых графиков к оси абсцисс не меняется. По этой причине величина подачи не оказывает существенного влияния на интенсивность изменения глубины дефектного поверхностного слоя при увеличении скорости резания (рисунок 5).

В результате проведенных исследований разработана физическая модель, отражающая физические закономерности формирования дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных спиральными сверлами следующим образом:

- погрешности заточки режущей части сверла (неодинаковая величина углов ϕ , длин главных режущих кромок, смещение поперечной кромки) вызывают осевое биение режущих кромок, от которого непосредственно зависит изменение величины подачи на зубьях сверла, определяющее появление и величину равнодействующей радиальной силы ΔP_y ;
- в результате отсутствия задних углов на вспомогательных задних поверхностях лезвий ленточек сверла, вспомогательные кромки ленточек не режут, а деформируют (сминают) обработанную поверхность, оказывая воздействие на нее с равнодействующей радиальной силой ΔP_y ;
- у сверл класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм имеет место прямая зависимость глубины дефектного поверхностного слоя от подачи, интенсивность изменения которой зависит от интенсивности уменьшения равнодействующей радиальной силы при увеличении подачи;
- скорость резания на силы резания непосредственного влияния не оказывает, однако в результате прямой зависимости разбивки отверстий от скорости резания имеет место обратная зависимость глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания.

Выводы. Разработана зависимость равнодействующей радиальной силы от осевого биения режущих кромок и подачи на оборот сверла.

Разработана физическая модель, отражающая физические закономерности формирования дефектного поверхностного слоя просверленных отверстий и характер влияния условий обработки сверлением на глубину дефектного поверхностного слоя.

Поступила: 29.05.23; рецензирована: 12.06.23; принята: 15.06.23.

Литература

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. М.: Машиностроение. 1975. 344 с.
2. Грановский Г.И. и др. Резание металлов / Г.И. Грановский, П.П. Грудов и др. М.: Машгиз, 1954. 471 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.
4. Рагрин Н.А. Физическая модель стойкостной зависимости при сверлении / Н.А. Рагрин // Технология машиностроения. М., 2012. № 11. С. 11–17.
5. ГОСТ 2034-80 Сверла спиральные. Технические условия.

6. *Рагрин Н.А.* Разработка методов повышения качества отверстий сверлением, обработанных сверлением / Н.А. Рагрин, У.М. Дыйканбаева // Научное обозрение. М.: Наука образования, 2020. № 1. С. 32–48.
7. *Рагрин Н.А.* Разработка и обоснование закономерностей повышения показателей качества отверстий, обработанных сверлением / Н.А. Рагрин, А.А. Айнабекова, У.М. Дыйканбаева // Известия КГТУ. Бишкек, 2018. № (46). С. 77–89.