
ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.951.45
DOI: 10.34641/ТМ.2023.256.10.074

Н. А. РАГРИН, д-р техн. наук
"Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б. Ельцина", г. Бишкек
У. М. ДЫЙКАНБАЕВА, ст. преподаватель
"Кыргызский ГТУ им. И. Раззакова", г. Бишкек
E-mail: n_ragrin@mail.ru

Разработка физических закономерностей влияния условий обработки спиральными сверлами на твердость поверхности просверленных отверстий

В работе получена зависимость для расчета равнодействующей радиальной силы при сверлении, разработаны физические закономерности влияния условий обработки сверлением на твердость поверхности просверленных отверстий.

In this paper, a dependence was obtained for calculating the resultant radial force during drilling, and physical laws were developed for the influence of drilling conditions on the surface hardness of drilled holes.

Ключевые слова: отверстие, сверло, сила резания, подача, сверление, твердость

Key words: hole, drill, cutting force, feed, drilling, hardness

ВВЕДЕНИЕ

Большое количество деталей технологической оснастки имеют отверстия высокой точности и относительно малого диаметра, от которых зависит качество и долговечность технологической оснастки, тем самым качество и себестоимость изготавливаемых изделий. Технологический процесс получения точных отверстий относительно малого диаметра содержит семь переходов обработки осевыми инструментами, первым из которых всегда является сверление. Особенности конструкции спиральных сверл: значительные передние

углы поперечных лезвий, глубина резания, равная половине диаметра сверла и большие длины главных режущих кромок, определяют значительные силы резания, которые повышают твердость поверхности отверстий, подлежащую дальнейшей обработке осевыми инструментами. Твердость поверхности отверстий, обработанных спиральными сверлами, является основным фактором, влияющим на стойкость следующих за сверлением осевых инструментов, что в значительной степени влияет на качество и себестоимость изготавливаемых изделий. Поэтому решение проблемы снижения твердости поверхности отверс-

тий, обработанных спиральными сверлами, с целью повышения качества и снижения себестоимости деталей машиностроения является актуальной задачей.

Анализ проблемы

Значительные силы резания на лезвиях спиральных сверл (рис. 1), приводят к изменению физико-механических свойств обработанной поверхности просверленных отверстий и повышают ее твердость.

Твердость поверхности просверленных отверстий зависит 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: $P_Z:P_Y:P_X = 1:0,5:0,3$, 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 табл. 1 приведена относительная величина осевой силы P_O при различных углах φ при сверлении стали средней твердости [2].

Таблица 1

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

Таблица 2

C_P	q	y	K_P
68	1,0	0,7	0,75

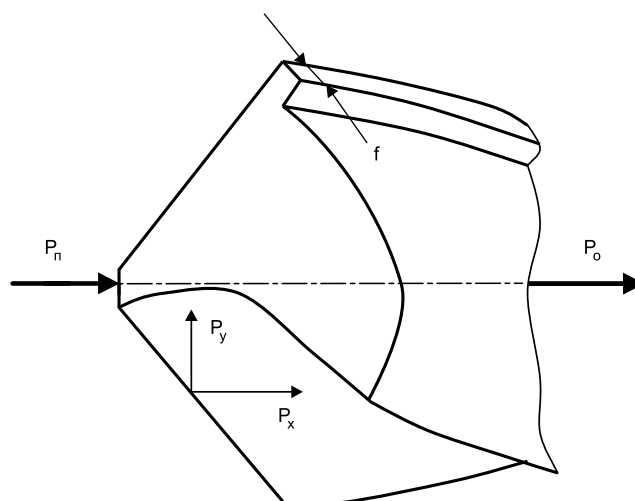


Рис. 1. Составляющие силы резания спирального сверла: P_O — осевая сила, $P_П$ — осевая сила поперечного лезвия, P_X — осевая сила главного лезвия, P_Y — радиальная сила главного лезвия

В табл. 1 видно, что при увеличении угла φ от 45° до 60° относительная величина P_O увеличивается, что соответственно приведет 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 табл. 2 [3].

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 $P_O = P_П + 2P_X$ (рис. 1). Доля осевой силы поперечного лезвия $P_П$ 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 вышеприведенного анализа определен коэффициент $C_{PY} = 21,75$, при использовании которого и зависимости (1) получена зависимость (2) для расчета радиальной силы на главных лезвиях при сверлении, имеющая вид

$$P_Y = C_{PY} D^q S^y K_P, \text{ кгс.} \quad (2)$$

Силы P_Y действующие на обоих главных лезвиях сверла и направленные навстречу друг другу, теоретически должны уравновешиваться. Однако, вследствие погрешности заточки сверл (неодинаковой величине углов ϕ , длин главных режущих кромок, смещения поперечной кромки) силы P_Y не равны, поэтому появляется равнодействующая радиальная сила ΔP_Y , направленная в сторону действия большей силы P_Y [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. Помимо этого имеется еще один конструктивный элемент — уголок, являющийся линией пересечения главного и вспомогательного режущих лезвий. Непосредственное воздействие на обработанную поверхность оказывают вспомогательные кромки ленточек и уголки, которые находятся в сплошном контакте с обработанной поверхностью из-за отсутствия задних углов на ширине ленточки f (рис. 1). Процесс резания при отсутствии задних углов невозможен, вспомогательные кромки ленточек и уголки не режут, а деформируют (сминают) обработанную поверхность, оказывая воздействие на нее силой ΔP_Y . Поэтому равнодействующая радиальная сила ΔP_Y непосредственно участвует в повышении твердости поверхности просверленных отверстий.

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

1. Разработать зависимость для расчета равнодействующей радиальной силы.
2. Разработать физические закономерности влияния условий обработки спиральными сверлами на твердость поверхности просверленных отверстий.

Результаты исследований

Анализ проблемы определил, 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 рис. 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 (рис. 2, вид А, сторона bc треугольника abc). Однако, основное влияние на осевую силу оказывает осевое биение режущих кромок, от которого зависит распределение подачи между зубьями сверла. Регламентирован-

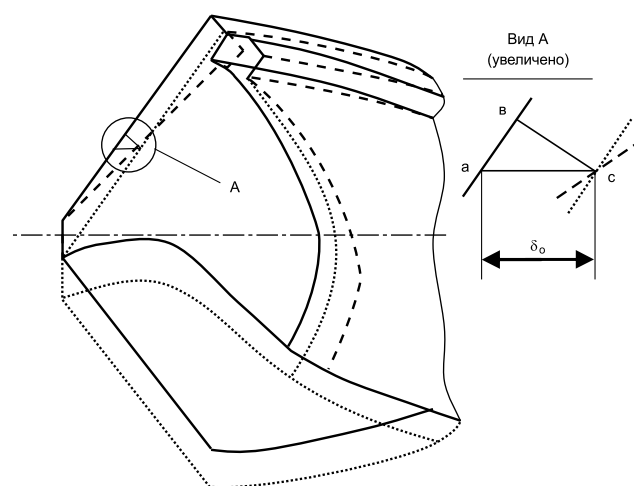


Рис. 2. Погрешности заточки сверл в результате смещения поперечной кромки, неравенства углов ϕ

ные стандартом [5] допуски биения сверл диаметром 11 мм и допуски осевого биения сверл этого диаметра (рис. 2, вид А, сторона $ac = \delta_0$ треугольника abc) представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, 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 (3) позволяющая рассчитать равнодействующую радиальную силу

$$\Delta P_Y = \frac{\delta_0}{S} P_Y = C_{PY} \delta_0 D S^{-0,3} K_P, \text{ кгс.} \quad (3)$$

В том случае, если осевое биение режущих кромок превышает величину подачи, 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 (табл. 4) и класса точности А1 с осевым биением 0,06 мм с двухплоскостной заточкой задних поверхностей (табл. 5).

Среднее значение твердости поверхности отверстий просверленных сверлами класса точности В (табл. 4) составляет $\overline{\text{HRC}}$ 14,1, тогда как среднее значение глубины дефектного слоя отверстий просверленных сверлами класса точности А1 составляет $\overline{\text{HRC}}$ 11,255.

У сверл класса точности А1 при максимальной подаче, равной 0,25 мм/об, рассчитанная по формуле (3) равнодействующая сила $\Delta P_Y = 16,32$ кгс, т.е. в 4,2 раза меньше, чем у сверл класса точности В. При этом среднее значение твердости поверхности отверстий в табл. 5 в 1,25 раза меньше, чем в табл. 4 (11,255 и 14,1 соответственно). Это означает, что уменьшение твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точ-

ности А1 по сравнению с отверстиями просверленными сверлами класса точности В не прямо пропорционально уменьшению равнодействующей силы. Равнодействующая сила зависит от подачи (3), поэтому основной причиной отсутствия прямой пропорции между уменьшением равнодействующей силы и уменьшением средней твердости поверхности отверстий может быть наличие функциональной зависимости между глубиной дефектного

Таблица 3

Допуск биения сверл классов точности		
A1 0,11	B1 0,2	B 0,3
Допуск осевого биения δ_0 сверл классов точности		
A1 0,14	B1 0,23	B 0,35

Таблица 4

V, м/мин	S, мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	HRC					
2,18					11,5	11,7
2,76				12	12,3	10,6
3,45			14,8	11,4	12,7	13,0
4,32		19,3	20,3	17,3	19,2	16,6
5,53	12,6	12,5	12,0	16,0	13,4	12,8

Таблица 5

V, м/мин	S, мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	HRC					
2,18					11,0	12,2
2,76				9,7	10,8	12,6
3,45			9,4	11,1	11,7	12,3
4,32		8,3	9,5	10,7	11,5	12,8
5,53	10,7	11,4	11,0	11,6	12,5	14,3

слоя и подачи у сверл класса точности А1 (табл. 5) при отсутствие такой зависимости у сверл класса точности В (табл. 4). Это подтверждается результатом корреляционного анализа взаимосвязи Пирсона r между подачей и твердостью поверхности отверстий, представленного в табл. 6.

Значимый коэффициент корреляции предполагает наличие прямой функциональной зависимости твердости поверхности отверстий просверленных сверлами класса точности А1 от подачи. Характер этой зависимости представлен графиками на рис. 3 [6].

На рис. 3 показано, что твердость поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности А1 имеет прямую зависимость от подачи, что оказывает влияние на среднее значение твердости поверхности этих отверстий.

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

На рис. 4 приведены графики зависимости суммы радиальной и равнодействующей радиальной сил представленных в табл. 7.

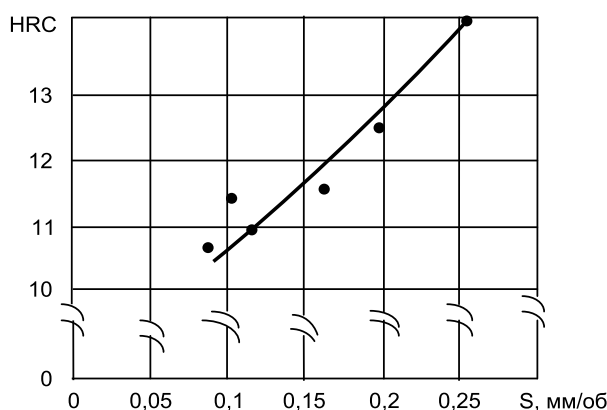


Рис. 3. Зависимости твердости поверхности отверстий от подачи сверл класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм, на скорости резания $V = 5,53$ м/мин

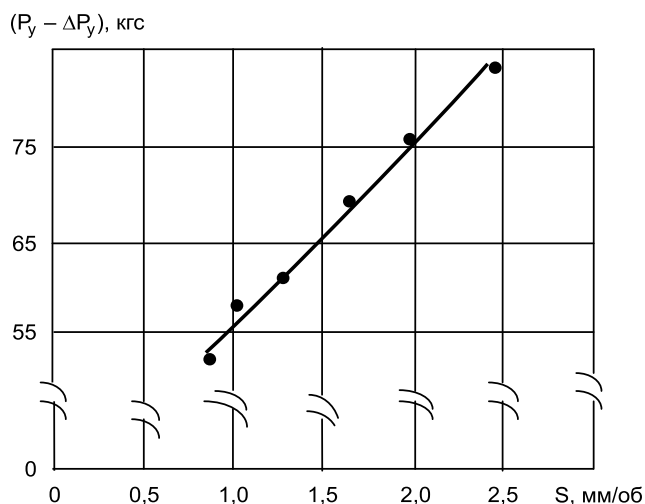


Рис. 4. Зависимость суммы радиальной силы и равнодействующей радиальной силы от подачи, сверла класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм

Таблица 6

V , м/мин	Сверла класса точности В		Сверла класса точности А1	
	r		r	
4,32	-0,682	не значим	0,99	значим
5,53	0,216	не значим	0,934	значим

Таблица 7

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	16,3
$(P_y + \Delta P_y)$, кгс	53,2	57,3	62,8	68,4	75,4	84,3

На рис. 4 видно, что суммарная радиальная сила равномерно возрастает с увеличением подачи. Характер зависимости суммарной радиальной силы от подачи аналогичен характеру зависимости твердости поверхности отверстий от подачи (рис. 3).

Скорость резания не влияет на силы резания при сверлении [1—4]. Однако в работе [6] приведена эмпирическая зависимость твер-

дости поверхности просверленных отверстий от скорости резания при сверлении сверлами класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм, представленная на рис. 5.

На рис. 5 представлены прямые зависимости твердости поверхности просверленных отверстий, от скорости резания на которых интенсивность увеличения твердости значи-

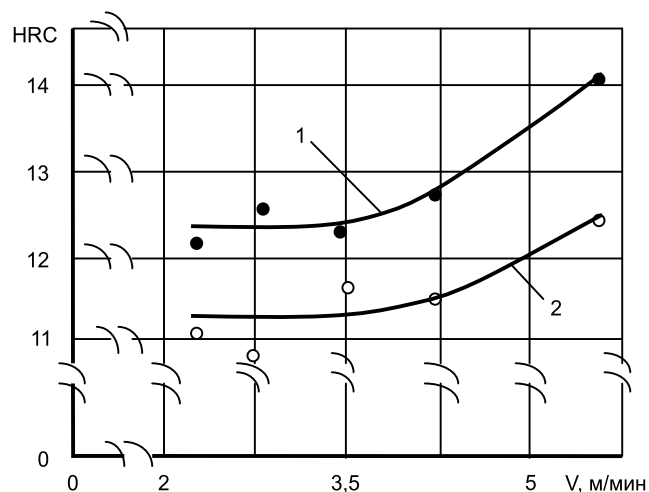


Рис. 5. Зависимости твердости поверхности просверленных отверстий от скорости резания: 1 — $S = 0,25$ мм/об, 2 — $S = 0,2$ мм/об

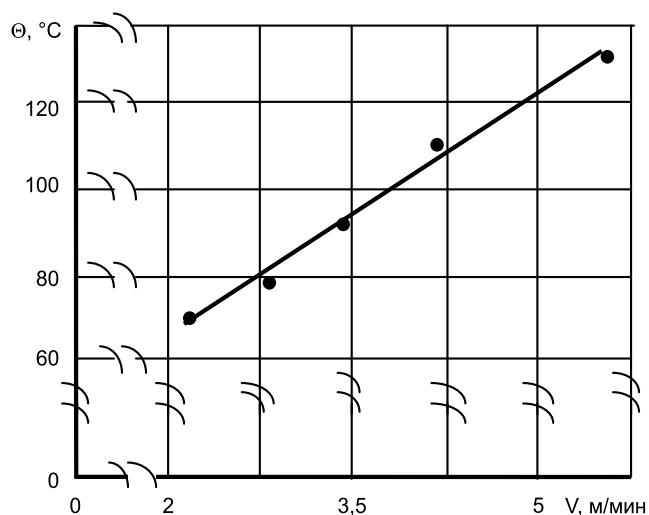


Рис. 6. Зависимости температуры в зоне резания от скорости резания, на подаче $S = 0,25$ мм/об, сверла класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм

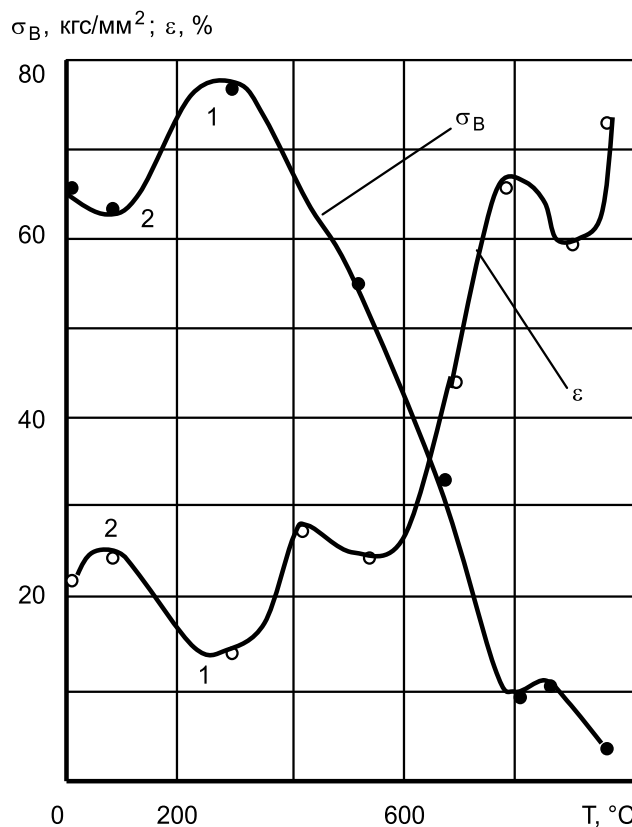


Рис. 7. Зависимость прочности и пластичности углеродистой конструкционной стали от температуры: ε — степень деформации, характеризующая пластичность материала, σ_b — предел прочности

тельно возрастает на скоростях резания 4,32 и 5,53 м/мин.

Известно, что температура в зоне резания в основном зависит от скорости резания. В работе [7] представлена эмпирическая зависимость температуры в зоне резания от скорости резания, имеющая вид

$$\Theta = 37,824V^{0,7328}. \quad (4)$$

Рассчитанные по зависимости (4) температуры в зоне резания показаны на рис. 6.

В работе [8] представлены зависимости прочности и пластичности углеродистой конструкционной стали от температуры (рис. 7) на которых прочность уменьшается, а пластичность растет на температурах меньших 200 °C, (участки 1—2 кривых рис. 7).

При увеличении скорости резания от 2,18 до 5,53 м/мин температура в зоне резания растет в пределах от 70 °С до 130 °С (рис. 7). Как видно на рис. 7 температуры на скоростях резания 2,18—3,45 м/мин (70—94 °С) находятся в области первого перегиба кривых графиков. Температуры скоростей резания 4,32 и 5,53 м/мин принадлежат участку 1—2 рис. 7, на котором с увеличением температуры прочность углеродистых сталей растет, а пластичность уменьшается. В результате интенсивность увеличения твердости на этих скоростях резания повышается (рис. 6).

В результате проведенных исследований разработаны физические закономерности влияния условий обработки спиральными сверлами на твердость поверхности просверленных отверстий:

— погрешности заточки режущей части сверл (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 уголках сверл и вспомогательных задних поверхностях лезвий ленточек, уголки и 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 твердости поверхности просверленных отверстий от подачи, интенсивность изменения которой зависит от суммы радиальной силы и равнодействующей радиальной силы равномерно возрастающей при увеличении подачи;

— скорость резания на силы резания непосредственного влияния не оказывает, однако в

результате прямой зависимости температуры в зоне резания от скорости резания в области температур резания на которых прочность углеродистой стали растет, а пластичность падает, имеет место прямая зависимость твердости поверхности просверленных отверстий от скорости резания, интенсивность которой возрастает на скоростях резания 4,32 м/мин и 5,53 м/мин.

ВЫВОДЫ

1. Разработана зависимость равнодействующей радиальной силы от осевого биения режущих кромок и подачи на оборот сверла.
2. Разработаны физические закономерности влияния условий обработки спиральными сверлами на твердость поверхности просверленных отверстий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
2. Грановский Г. И., Грудов П. П. Резание металлов / М.: Машгиз, 1954. 471 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. 5-е изд., перераб. и доп. / М.: Машиностроение, 2001. 912 с.
4. Разгин Н. А. Физическая модель стойкостной зависимости при сверлении // Технология машиностроения. 2012. № 11. С. 11—17.
5. ГОСТ 2034—80 Сверла спиральные. Технические условия.
6. Разгин Н. А., Дыйканбаева У. Д., Айнабекова А. А., Курганова Д. М. Повышение качества поверхностного слоя отверстий при обработке сверлением / Бишкек: ИМАНАН КР. Машиноведение, 2021. № 2. С. 76—82.
7. Разгин Н. А., Айнабекова А. А., Дыйканбаева У. М. Разработка основ повышения качества отверстий обработанных стандартными спиральными сверлами // Технология машиностроения. 2023. № 1. С. 5—12.
8. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. / М.: Машиностроение, 1977. 423 с.