

УДК 621.951.45

DOI:10.30987/2223-4608-2021-12-31-36

Р.В. Гусейнов, д.т.н., **Л.М. Султанова**, к.т.н.
(Дагестанский государственный технический университет,
РФ, 367015, Республика Дагестан, г. Махачкала, просп. Имама Шамиля, д. 70),
К.Н. Сахно, д.т.н., **А.Р. Рубан**, к.т.н.
(Астраханский государственный технический университет,
РФ, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16)
E-mail: ragus05@mail.ru

Совместное влияние скорости резания и подачи на силовые характеристики при сверлении

Представлен анализ работ, посвященных исследованию силовых характеристик при сверлении. Приведены результаты исследования совместного влияния скорости резания и подачи на силовые характеристики при сверлении деталей из стали 45 с использованием метода планирования экспериментов по плану 2^2 . Показано существование парного взаимодействия, что позволило оценить силу влияния одного из факторов в зависимости от уровня, на котором находится другой.

Ключевые слова: сверление; осевая сила; крутящий момент; метод планирования экспериментов.

R.V. Guseynov, Dr. Sc.Tech., **L.M. Sultanova**, Can.Sc.Tech.
(Dagestan State Technical University, 70, ave. Imam Shamil, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367015, RF),
K.N. Sakhno, Dr. Sc.Tech., **A.R. Ruban**, Can.Sc.Tech.
(Astrakhan State Technical University, 16, st. Tatishcheva, Astrakhan, 414056, RF)

The combined effect of cutting speed and feed on the power characteristics in the time of drilling

The analysis of works devoted to the study of power characteristics in the course of drilling is presented. Research results of the combined effect of cutting speed and feed on the power characteristics when drilling steel parts 45 using the experiment planning method according to plan 2^2 are presented. The existence of pair interaction is shown, which made it possible to assess the power of influence of one of the factors depending on the level where the other is located.

Keywords: drilling; axial force; operating torque; experiment planning method.

Введение

Сверление является весьма распространенным видом обработки металлов. Более 60 % всех деталей машин имеют отверстия различной точности и шероховатости поверхностей.

В машиностроительном производстве, судостроении сверлильные станки составляют до 30 % общего станочного парка. Спираль-

ные сверла как основной инструмент для обработки отверстий составляют до 23 % от общего количества используемого инструмента. Однако законы резания для сверления разработаны относительно слабее, чем для других видов обработки. Это связано со сложностью процесса резания, более сложной формой сверла, значительно худшими условиями образования и отвода стружки.

Анализ работ, посвященных исследованиям силовых характеристик при сверлении, позволил сделать вывод, что все исследователи для расчета указанных характеристик рекомендуют использовать диаметр сверла D и подачу S [1]:

$$M = C_M D^{X_M} S^{Y_M}; P_0 = C_0 D^{X_0} S^{Y_0}, \quad (1)$$

где C_M и C_0 – коэффициенты, характеризующие условия сверления и свойства материала.

В некоторых работах в расчет введена твердость обрабатываемого материала [2]:

$$M = C_M D^{X_M} S^{Y_M} HB^N; P_0 = C_0 D^{X_0} S^{Y_0} HB^N. \quad (2)$$

В работе [3] введены поправочные коэффициенты:

$$M = C_M D^{X_M} S^{Y_M} k_M, P_0 = C_0 D^{X_0} S^{Y_0} k_0. \quad (3)$$

Необходимо заметить, что указанные зависимости рекомендуются только для нового (неизношенного) инструмента, что сужает область их использования.

Важным параметром, влияющим на силовые характеристики, является скорость резания v . Многочисленные исследования показывают, что зависимость силовых характеристик от скорости резания имеет нелинейный характер [4, 5].

На практике скорость резания выбирается исходя из определенной (нормативной) стойкости сверла. Полагается, что использование в формуле для расчета скорости главного движения резания нормативного периода стойкости T дает скорость главного движения резания, обеспечивающую минимальную себестоимость операции сверления. Поскольку при отсутствии других ограничительных факторов наименьшая себестоимость операции должна служить основным критерием оптимальности выбранных режимов, расчет оптимальных режимов резания в первом приближении производится с учетом нормативного периода стойкости.

Скорость резания, м/мин, при сверлении [1]:

$$v = \frac{C_v D^q}{T^m S^y} K_v. \quad (4)$$

Многочисленные эксперименты по сверлению, проведенные авторами и другими отечественными и зарубежными исследователями показывают, что значения постоянных C_v, q, m, y, K_v , а также x_M, y_M, C_M, k_M , зависящих от

обрабатываемого, инструментального и т.п. материалов у различных экспериментаторов значительно отличаются по величине друг от друга.

Разнобой в значениях постоянных коэффициентов по данным различных исследователей можно объяснить рядом причин, главные из которых: недостаточно точная классификация обрабатываемых материалов; различные методы и приборы для измерения силовых характеристик; разные размеры, формы применяемого инструмента, связанные с тем, что нормальные спиральные сверла различных диаметров геометрически не подобны и условия резания отличаются и др. Кроме того, влияние степени износа сверл, жесткости, вибрационных характеристик технологической системы не учитывается как существующими формулами, так и нормативами.

Предлагаемый метод решения проблемы

Назначение оптимального режима резания заключается в выборе выгодного сочетания режимов резания: скорости резания и подачи, обеспечивающих в данных условиях с учетом целесообразного использования режущих свойств инструмента и кинематических возможностей оборудования, наибольшую производительность общественного труда и наименьшую себестоимость операции. При этом должны быть полностью использованы режущая способность инструмента и прочность при соблюдении требований к точности, шероховатости поверхностей и качеству обработки с учетом виброустойчивости системы СПИЗ.

В работе [6] описаны различные оптимизационные модели резания металлов. Авторы [7] для решения задачи определения оптимальных параметров при обработке металлов резанием предлагают геометрическое программирование, причем в качестве критерия выбора оптимальных параметров скорости и подачи используется минимум общих затрат в расчете на одну деталь.

Некоторые исследователи предлагают несколько критериев оптимизации. Так, в работе [8] предлагают метод оптимизации по двум критериям оптимизации, а именно, интенсивности резания и стойкости инструмента. Учитывая, что любой экономический критерий может быть выражен как функции производительности обработки и стойкости инструмента [9], а последние находятся в прямой зависимости от сил резания, считаем целесообразным в качестве критерия оптимизации режи-

мов резания при сверлении углеродистых конструкционных сталей использовать минимум крутящего момента и осевых сил.

Для учета совместного влияния нескольких факторов на параметр оптимизации широко используется метод планирования экспериментов. Многолетний опыт показал, что указанный подход в оптимизационных задачах резания металлов, является эффективным [10].

С целью определения величины вклада скорости резания и подачи в общий баланс сил и моментов резания при сверлении остро заточенными сверлами были проведены лабораторные испытания сверл диаметром 14 мм по ГОСТ 10903-77 из быстрорежущей стали Р6М5. Заточка сверл стандартная ($2\phi = 118^\circ$). Сверлились отверстия глубиной, равной трем диаметрам сверла в заготовках из стали 45, 278 НВ. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовался пятипроцентный раствор эмульсола «Укринол-1».

Для измерения крутящего момента был использован разработанный динамометр, который отвечает всем метрологическим требованиям, в частности требованиям: иметь малую инерционность, что достигается за счет обеспечения собственной частоты колебаний механической части динамометра величины, превышающей частоты регистрируемых колебаний в три раза; высокой точностью (в пределах 1...3 %) измерения составляющих силы резания [11].

Важным этапом при планировании экспериментов является определение локальной области определения независимых факторов (скорости и подачи).

Как было указано выше, рекомендуемое значение подачи S зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала; диаметра сверла; характера операции и

некоторых других факторов. Еще необходимо иметь в виду, что с увеличением подачи растет шероховатость обработанных отверстий.

Для обычных условий сверления:

$$S = K_S \cdot K_{НВ} \cdot D, \quad (5)$$

где K_S – коэффициент, определяющий группу обрабатываемого материала; $K_{НВ}$ – поправочный коэффициент, учитывающий твердость обрабатываемого материала.

Подставляя справочные значения указанных коэффициентов для рассматриваемых условий резания, получим $S = 0,2$ мм/об.

Учитывая, что зависимости стойкости от скорости резания быстрорежущих спиральных сверл имеют явно выраженный максимум в диапазоне скоростей резания 12...16 м/мин при выборе диапазона изменения скоростей резания принят скоростной диапазон 7,8...15 м/мин из диапазона рекомендуемых [12].

Было решено варьировать каждый из факторов на двух уровнях. Интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях указаны в табл. 1.

1. Уровни факторов

Факторы	X_1 , м/мин	X_2 , мм/об.
Основной уровень	11,4	0,15
Интервал варьирования	3,6	0,05
Нижний уровень	7,8	0,1
Верхний уровень	15	0,2

Для получения возможно более полной информации об изучаемых зависимостях воспользуемся полным факторным экспериментом 2^2 . План эксперимента в кодовом и натуральном масштабах записан в табл. 2.

2. План 2^2 и результаты опытов

Номер эксперимента	Порядок реализации	Кодовый масштаб		Натуральный масштаб		Y_1 , крутящий момент, Н·м	Y_2 , осевая сила, Н
		X_1	X_2	X_1 подача, мм/об	X_2 скорость, м/мин		
1	1	+	+	0,2	15	14,11	860,8
2	4	+	-	0,2	7,8	15,5	1120,6
3	2	-	+	0,1	15	8,85	582,4
4	3	-	-	0,1	7,8	11,14	746,8

Кодированные значения факторов (x_i) связаны с натуральными (X_i) соотношениями:

$$x_1 = \frac{X_1 - 0,15}{0,05}; \quad x_2 = \frac{X_2 - 11,4}{3,6}. \quad (6)$$

Последовательность обработки результатов эксперимента, в нашем случае равномерного дублирования опытов, следующая: расчет дисперсии опыта; расчет коэффициентов рег-

рессии; проверка статистической значимости коэффициентов; проверка адекватности модели.

После реализации полного факторного эксперимента 2^2 получены следующие уравнения регрессии в натуральном масштабе:

$$M = 10,83 + 29,85 S - 0,5 v + 1,61 vS; \quad (7)$$

$$P_o = -287 + 9648,2 S + 55,5 v - 563 vS. \quad (8)$$

Гипотеза об адекватности полученной модели при 5%-ном уровне значимости не отвергается.

На рис. 1, 2 представлены зависимости крутящего момента и осевой силы, соответственно, от скорости резания при сверлении отверстий диаметром 14 мм в стали 45 для различных подач S .

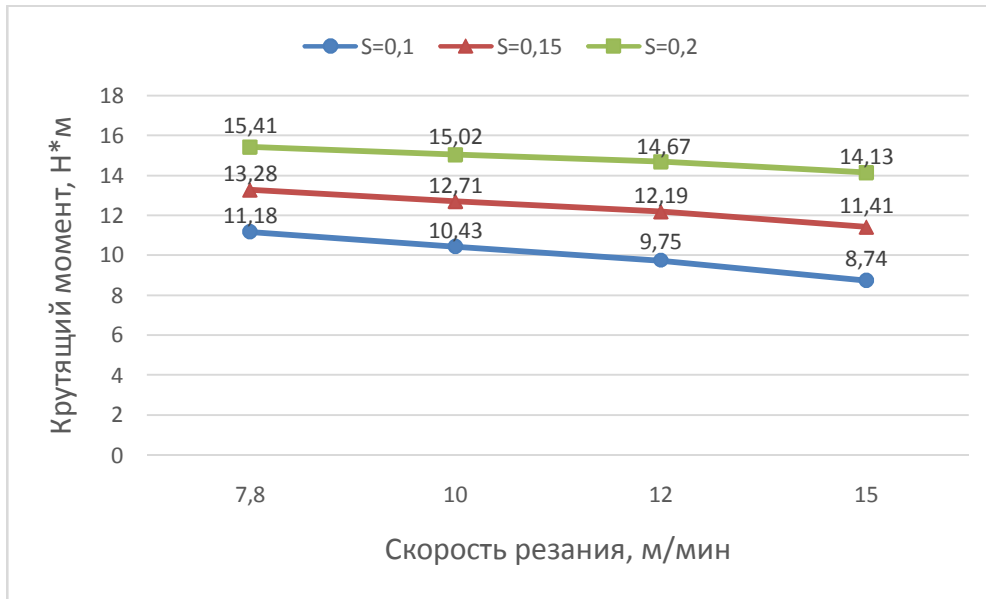


Рис. 1. Зависимость крутящего момента от скорости резания для различных подач S , мм/об

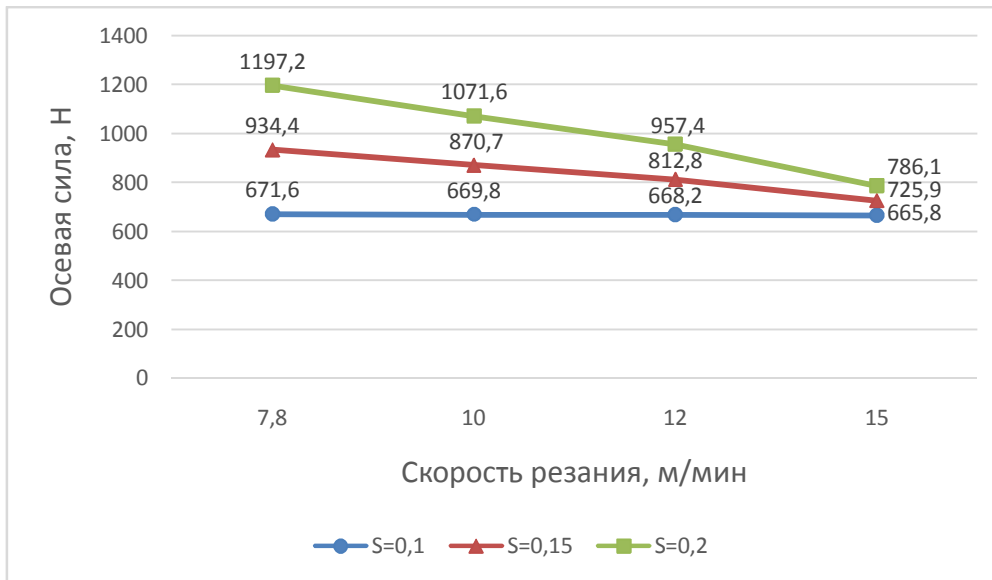


Рис. 2. Зависимость осевой силы от скорости резания для различных подач S , мм/об

Осевая сила повышается с увеличением подачи для всех рассматриваемых скоростей резания (рис. 3). Степень влияния подачи на ве-

личину осевой силы зависит от скорости. «Крутизна» данной характеристики уменьшается при увеличении скорости резания.

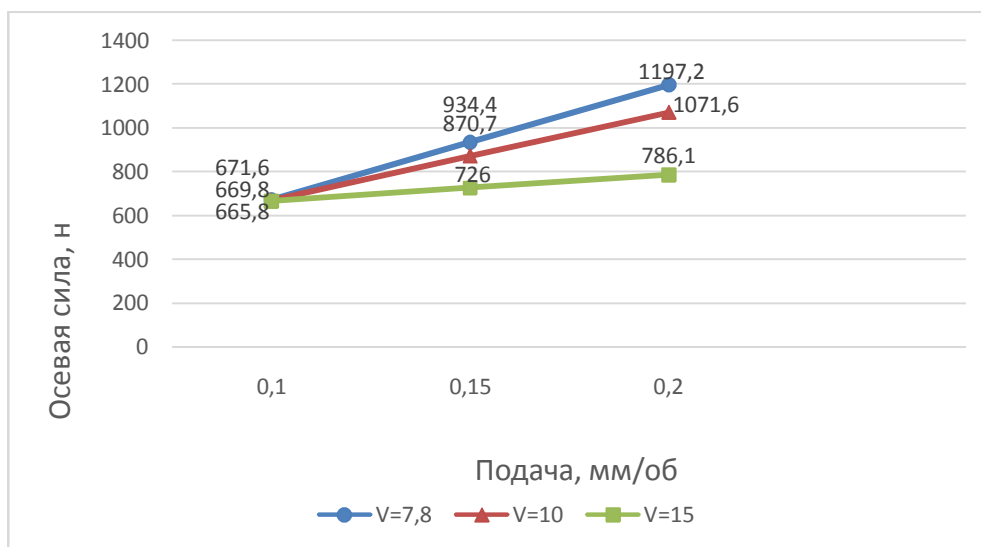


Рис. 3. Зависимость осевой силы от подачи для различных скоростей резания v , м/мин

Характер влияния скорости резания на крутящий момент и осевую силу одинаков. Как крутящий момент, так и осевая сила падают с увеличением скорости резания для всех рассматриваемых подач ($S = 0,1; 1,15; 0,2$ мм/об). Таким образом, полученные функции зависимости силовых характеристик от совместного влияния скорости резания и подачи не имеет экстремума и поиск оптимального сочетания значений скорости и подачи по критерию минимума крутящего момента и осевой силы не представляется возможным.

Предпочтительными для достижения минимальных значений крутящего момента являются наибольшие значения скоростей резания из рассматриваемого скоростного диапазона. Однако необходимо иметь в виду, что с увеличением скорости резания уменьшается деформируемый объем металла, увеличивается температура на контактных поверхностях. При этом наблюдается различное тепловыделение по длине режущей кромки, что приводит к неодинаковому износу в различных точках каждой из режущих кромок инструмента.

В процессе проведения экспериментов выявлено, что с увеличением износа сверла характер влияния скорости резания на крутящий момент возрастает.

Заключение

Отметим, что все соображения о направлении и силе влияния рассматриваемых факторов на крутящий момент и осевую силу можно высказывать только для выбранных в работе

интервалов изменения скоростей резания и подачи.

Анализ полученных уравнений показывает, что поиск оптимального сочетания значений скорости и подачи по критерию минимума крутящего момента и осевой силы не представляется возможным.

Наиболее сильно крутящий момент и осевая сила зависят от подачи. Это можно объяснить следующим образом: сопротивление резанию увеличивается с увеличением объема срезаемой стружки, которая находится в прямой зависимости от величины подачи.

Наблюдается эффект парного взаимодействия, который показывает силу влияния одного из факторов в зависимости от уровня, на котором находится другой. Изменение толщины среза меняет отношение между скоростью резания и крутящим моментом. Чем больше увеличивается толщина среза, тем больше должна уменьшаться скорость резания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Справочник** технолога-машиностроителя. Т. 2. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – С. 176-279.
2. **Грановский, Г.И.** Металлорежущий инструмент. Конструкция и эксплуатация. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машгиз, 1954. – 316 с.
3. **Основы** учения о резании металлов и режущий инструмент / С.А. Рубентейн, Г.В. Левант, Н.М. Орнис и др. – М.: Машиностроение, 1968. – 392 с.

4. Гусейнов, Р.В. Вибрации при обработке отверстий резанием // Металлообработка. – 2017. – №4 (100). – С. 23-28.

5. Гусейнов, Р.В. Расчетная модель динамики нелинейных систем // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2015. – №1 (36). – С. 24-30.

6. Guthrie, K.M. Data and Techniques for Preliminary capital Cost Estimating, in: modern Cost Engineering techniques (H. Popper, Ed.) McGraw-Hill, N.Y., 1970.

7. Реклейтис, Г.Б., Рейвиндран, А., Рэгсдел, К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн. 2. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 320 с.

8. Ravignani, O.L., Tipnis, V.A., Friedman, M.Y. Cutting Rate-Tool Life Functions (R–T–F) General Theory and Applications // Annals of the CIRP. – 1977. – Vol. 25/1. – P. 295.

9. Жедь, В.П., Сосон, А.И., Башков, В.М. Метод расчета оптимальных режимов резания // Вестник машиностроения. – 1979. – №9. – С. 43-45.

10. Гусейнов, Р.В. Исследование влияния геометрических параметров инструмента на силы резания при обработке внутренних поверхностей методом планирования экспериментов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2011. – №2 (21). – С. 83-87.

11. Гусейнов, Р.В. Динамометрическая аппаратура для измерения составляющих сил резания при обработке осевым инструментом // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2018. – №45 (1). – С. 22-29.

12. Древал, А.Е., Рагрин, Н.А., Самсонов, В.А. Формирование отказов спиральных сверл в условиях автоматизированного производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.technomag.edu.ru/index.html>.

REFERENCES

1. Handbook of the technologist-machine builder, Vol. 2, edited by A.M. Dalsky, A.G. Suslov, A.G. Kosilova,

R.K. Meshcheryakov, 5-th ed., reprinted and added, M.: Mashinostroenie, 2001, pp. 176-279.

2. Granovsky, G.I. Metal-cutting tools. Construction and operation, 2-nd ed., reprinted and added, M.: Mashgiz, 1954, 316 p.

3. Fundamentals of the theory of metal cutting and cutting tools / S.A. Rubinstein, G.V. Levant, N.M. Ornis, et.al, M.: Mashinostroenie, 1968, 392 p.

4. Guseynov, R.V. Vibrations when using hole-making cutting job. Metalworking, 2017, No.4 (100), pp.23-28.

5. Guseynov, R.V. Computational model of dynamics of nonlinear systems. Bulletin of Dagestan State Technical University, Technical sciences, 2015, No. 1 (36), pp. 24-30.

6. Guthrie, K.M. Data and Techniques for Preliminary capital Cost Estimating, in: modern Cost Engineering techniques (H. Popper, Ed.) McGraw-Hill, N.Y., 1970.

7. Reklaitis, G.B., Ravindran, A., Ragsdel, K. Optimization in technology, 2 books, book 2. Trans. from English - M.: Mir, 1986, 320 p.

8. Ravignani, O.L., Tipnis, V.A., Friedman, M.Y. Cutting Rate-Tool Life Functions (R–T–F) General Theory and Applications // Annals of the CIRP, 1977, Vol. 25/1, P. 295.

9. Zhed, V.P., Sosin, A.I., Bashkov, V.M. Method of calculating optimal cutting modes. *Vestnik mashinostroeniya*, 1979, No. 9, pp. 43-45.

10. Guseynov, R.V. Investigation of the influence of the tool geometry on cutting while cutting internal surfaces by the method of experiment planning. Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences, 2011, No.2 (21), pp. 83-87.

11. Guseynov, R.V. Dynamometric equipment for measuring the components of cutting strengths when processing materials with axial tools. Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences, 2018, No.45 (1), pp. 22-29.

12. Dreval, A.E., Ragrin, N.A., Samsonov, V.A. Formation of failure of spiral drills in a computer-aided manufacturing. [Electronic resource], access mode: <http://www.technomag.edu.ru/index.html>.

Рецензент д.т.н.
Максим Николаевич Нагоркин

