

SANYUKEVICH F.M., MONTIK S.V. Calculation of mechanisms at course design of details of cars

It is offered to use more widely at course design of details of cars mechanisms and drives of load-lifting and transporting devices, as one of the most important means of mechanization in conditions of production. Recommendations about ensuring normal operation of these mechanisms are made and the corresponding dependences are given.

УДК 621.906-529

Медведев О.А., Фу Чао

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ И ОГРАНИЧЕНИЙ РЕЖИМА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ СПИРАЛЬНЫМИ СВЕРЛАМИ

Сущность вопроса и задачи исследования. Определение оптимальных режимов резания материалов необходимо при проектировании высокоэффективных концентрированных операций механической обработки, выполняемых на дорогостоящих станках с ЧПУ, в гибких производственных системах и на автоматических линиях. Режимы резания оказывают наиболее существенное влияние на трудоемкость механической обработки и эффективность использования станков и режущих инструментов. Традиционные методики расчета режимов сверления, изложенные в учебной и справочной литературе, не обеспечивают комплексный учет факторов, ограничивающих режимы сверления. Поэтому после расчета режимов требуется их поэтапная трудоемкая корректировка с учетом конкретных условий обработки.

Параметры, описывающие процесс резания, подразделяются на входные (глубина резания, подача, скорость резания, частота вращения заготовки или инструмента, геометрия и материал инструмента и заготовки и т.п.) и выходные (силы и мощность резания, стойкость инструмента, трудоемкость, производительность, себестоимость, параметры качества получаемой поверхности и т.п.). При разработке методик оптимизации режимов резания исходят из того, что все входные параметры процесса резания, кроме искомого параметра, постоянны и могут быть определены и выдержаны. Искомые параметры (обычно частота вращения и подача) могут целенаправленно изменяться до необходимых значений. Функциональные зависимости между входными и выходными параметрами составляют математическую модель процесса резания. Обычно один из наиболее объективных выходных параметров процесса резания принимается в качестве критерия (функции) оптимизации. Для остальных выходных параметров устанавливаются допустимые диапазоны значений с учетом характеристик оборудования, технологической оснастки и условий производства. Оптимальными значениями искомого параметра считаются те, при которых функция оптимизации приобретает максимальное или минимальное значение (оптимум). Наиболее часто в качестве функции оптимизации принимается зависимость себестоимости обработки [1, 2, 6] или зависимость трудоемкости обработки [6, 7] от режимов резания. Также в качестве функции оптимизации или ограничивающего параметра принимаются: стойкость инструмента; ресурс инструмента; норма сменной выработки деталей; норма сменной потребности в инструменте; энергозатраты и др.

Наиболее просто проводится оптимизация одного из параметров режима резания без учета технических ограничений и при условии постоянства остальных входных параметров режима. Например, в [2] приводится общая методика аналитического определения скорости резания при точении, которая обеспечивает минимум себестоимости обработки. Для этого разработана математическая зависимость себестоимости от скорости резания, найдено выражение для производной себестоимости по скорости резания, из которого получена формула для расчета искомой скорости.

В реальных производственных условиях приходится учитывать множество факторов, ограничивающих режимы резания и

усложняющих задачу определения реальных оптимальных режимов. К ним относятся: ограниченная режущая способность инструмента; технические возможности оборудования и оснастки (кинематические, силовые, по мощности, по жесткости); предельно допустимая температура в зоне резания; требуемые параметры точности и качества получаемой поверхности и др. Из-за сложности взаимосвязей указанных факторов и режимов резания разработать математическую модель процесса резания с учетом всех ограничений и выполнить на ее основе полную оптимизацию режимов резания практически невозможно. Поэтому в большинстве случаев проводится частичная оптимизация с учетом наиболее существенных ограничивающих факторов [1, 2, 6, 7].

Одним из наиболее широко применяемых методов определения оптимальных режимов резания при наличии технических ограничений является линейное программирование [1, 6, 7]. Основным условием применения этого математического метода является линейный характер функции оптимизации и ограничений на режимы резания. Глубина резания принимается постоянной, а частота вращения заготовки (или инструмента) и подача – переменными. Ограничения выражаются в виде неравенств, отражающих зависимость ограничивающего параметра от частоты и подачи.

Многие основные ограничения (по стойкости инструмента, по мощности привода станка, по предельным силам привода подач и т.п.) составляются на основе эмпирических формул для расчета скоростей резания, сил и моментов резания, и поэтому отражают нелинейные степенные зависимости ограничивающих параметров от режимов резания. Также нелинейный характер может иметь функция оптимизации, например зависимость основного времени от частоты и подачи. Во многих случаях для использования линейного программирования такие математические выражения удается привести к линейному виду путем логарифмирования и замены логарифмов частоты и подачи на новые буквенные обозначения. Совокупность ограничений в виде полученных линейных неравенств и линейная функция оптимизации представляют собой математическую модель процесса резания. Определение оптимальных значений новых переменных функции оптимизации проводится аналитически, численными методами с помощью ЭВМ или графически.

Однако обзор литературных источников, посвященных оптимизации режимов резания, показал, что готовые математические модели приведены лишь для точения. Для других методов обработки резанием, в том числе и для сверления, подобные модели отсутствуют. С учетом сказанного возникает необходимость решения следующих задач:

- 1) обоснование выбора объективной и пригодной для оптимизации методом линейного программирования функции оптимизации режимов сверления отверстий и составление ее математического выражения;
- 2) обоснование состава существенных параметров, ограничивающих режимы сверления, и разработка математических выражений для ограничений режимов сверления;
- 3) разработка процедуры определения оптимальных значений

Медведев Олег Анатольевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Брестского государственного технического университета.

Фу Чао (КНР), магистрант кафедры «Технология машиностроения» Брестского государственного технического университета. Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

режимов сверления.

Выбор функции оптимизации режимов сверления. Наиболее комплексным показателем эффективности любого процесса резания является уровень приведенных затрат на его выполнение, который зависит от капитальных вложений в оборудование и производственное помещение, а также от себестоимости обработки. В условиях действующего производства, с определенным парком оборудования, режимы резания не влияют на капитальные вложения. От них зависят основные составляющие себестоимости: заработная плата основных рабочих; расходы на инструмент; затраты на энергоносители; амортизационные отчисления. Указанные части себестоимости прямо пропорциональны норме штучного (или штучно-калькуляционного) времени, и следовательно, их оптимумы достигаются при одинаковых режимах. Поэтому использование нормы времени в качестве функции оптимизации режимов резания (вместо себестоимости) практически не снизит объективность определения оптимальных режимов, но позволит упростить математическое выражение для функции оптимизации.

В состав штучного времени входят лишь две составляющие, непосредственно зависящие от режимов резания: основное технологическое время и доля времени на смену инструмента в расчете на одну деталь.

Для сверления отверстий спиральными сверлами основное время определяется по формуле

$$T_o = \frac{L}{n \cdot s}, \quad (1)$$

где L – путь резания, мм; n – частота вращения заготовки или сверла, мин⁻¹; s – оборотная осевая подача сверла или заготовки, мм/об.

Долю времени на смену затупившегося сверла в расчете на одну деталь можно определить по формуле [2]:

$$t_{cm} = T_{cm} \frac{T_o}{T}, \quad (2)$$

где T_{cm} – время на смену одного сверла, мин; T – стойкость сверла, мин.

Тогда сумму составляющих штучного времени, зависящих от режимов резания, можно представить выражением

$$T_{\Sigma} = T_o \left(1 + \frac{T_{cm}}{T} \right). \quad (3)$$

Значимость второго слагаемого внутри скобок в формуле (2) можно оценить сопоставлением времени на смену сверла, приведенным в нормативах времени [3], и периоды стойкости сверла [5]. Для сверл из быстрорежущей стали диаметром 10...20 мм при установке в сверлильный патрон или по конусу Морзе в шпиндель вертикально-сверлильного станка $T_{cm} = 0,12...0,17$ мин, а нормативная стойкость $T = 45...60$ мин. Следовательно, второе слагаемое не превысит 0,004 и им можно пренебречь.

Проведенный анализ показывает, что в качестве функции оптимизации режимов сверления (практически равноценной себестоимости сверления) можно принять зависимость основного времени от частоты вращения и осевой подачи сверла, определяемую формулой (24). Для упрощения математического выражения объективной функции оптимизации и учитывая то, что минимум основного времени будет достигнут при максимуме минутной подачи сверла, окончательно в качестве функции оптимизации целесообразно принять минутную подачу, равную произведению оборотной подачи на частоту вращения сверла. Таким образом, оптимизация режима сверления по критерию минимальных приведенных затрат сводится к определению таких допустимых значений частоты и оборотной подачи сверла, при которых их произведение максимально.

Теоретически, максимум минутной подачи будет достигнут при бесконечно больших значениях n и s . Но реализовать такие режимы невозможно, ввиду действия ряда ограничений на параметры режима резания: по стойкости режущего инструмента; по мощности привода главного движения сверлильного станка; по предельным

паспортным частотам вращения и подачам шпинделя станка; по предельно допустимой силе привода подач станка и др.

Для определения реальных значений n и s , при которых минутная подача и приведенные затраты оптимальны и удовлетворяют всем указанным ограничениям, необходимо выразить эти ограничения в виде математических неравенств и решить их численно или графически совместно с функцией оптимизации.

Ограничения режима сверления. Ограничение по стойкости режущего инструмента можно получить из эмпирической формулы для расчета скорости резания при сверлении (17) и выражения взаимосвязи скорости резания с частотой вращения сверла (19)

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot s^y}, \quad (4)$$

где C_v – параметр обрабатываемости; D – диаметр сверла, мм; T – нормативная стойкость сверла, мин; s – оборотная подача, мм/об; K_v – поправочный коэффициент; m, y – показатели степени.

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (5)$$

где D – диаметр сверла, мм; n – частота вращения сверла, мин⁻¹.

Приравняв (4) и (5), после преобразований получим ограничение на n и s по стойкости сверла

$$n \cdot s^y \leq \frac{1000 \cdot C_v \cdot D^q \cdot K_v}{\pi \cdot D \cdot T^m}. \quad (6)$$

Ограничение по мощности получим на основе эмпирической формулы (7) для расчета крутящего момента при сверлении, формулы (8) для расчета эффективной мощности резания и соотношения (9) между мощностью электродвигателя привода главного движения станка и эффективной мощностью резания и коэффициентом полезного действия привода

$$M_{кр} = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot s^y \cdot K_p, \quad (7)$$

где C_M – параметр обрабатываемости; D – диаметр сверла, мм; s – оборотная подача сверла, мм/об; y, q – показатели степени; K_p – поправочный коэффициент на силу и момент резания.

$$N_{\Sigma} = \frac{M_{кр} \cdot n}{9750}, \text{ кВт}, \quad (8)$$

$$N_{\Sigma} \leq N \cdot \eta, \quad (9)$$

где η – КПД привода главного движения станка.

Подставив (7) в (8), затем полученное выражение для N_{Σ} в (9), после преобразований получим ограничение на n и s по мощности привода главного движения станка

$$n \cdot s^y \leq \frac{975 \cdot N \cdot \eta}{C_M \cdot D^q \cdot K_p}. \quad (10)$$

Ограничения по предельным паспортным частотам вращения шпинделя n_{min} и n_{max} и предельным паспортным оборотным подачам сверлильного станка s_{min} и s_{max} выразим следующими неравенствами

$$n \geq n_{min}, \quad (11)$$

$$n \leq n_{max}, \quad (12)$$

$$s \geq s_{min}, \quad (13)$$

$$s \leq s_{max}. \quad (14)$$

Ограничение на подачу при сверлении с учетом марки обрабатываемого материала принимаем из нормативов [3].

$$s \leq S_T \cdot K_{sm}, \quad (15)$$

где S_T – табличное значение подачи; K_{sm} – поправочный коэффициент на подачу для измененных условий работы в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала.

Ограничение на частоту вращения сверла с учетом обрабатываемого материала, применения охлаждения, состояния поверхности заготовки, марки инструментального материала, формы

заточки сверла, длины рабочей части сверла, покрытия инструмента принимаем из нормативов [3].

$$V \leq V_T \cdot K_{vm} \cdot K_{vj} \cdot K_{vw} \cdot K_{vu} \cdot K_{vs} \cdot K_{vl} \cdot K_{vp}, \quad (16)$$

где V_T – табличное значение скорости резания [2]; $K_{vm}; K_{vj}; K_{vw}; K_{vu}; K_{vs}; K_{vl}; K_{vp}$ – поправочные коэффициенты на скорость резания.

Подставив (16) в (5), после преобразований получим ограничение на n с учетом указанных ранее факторов

$$n \leq \frac{1000 \cdot V_T \cdot K_{vm} \cdot K_{vj} \cdot K_{vw} \cdot K_{vu} \cdot K_{vs} \cdot K_{vl} \cdot K_{vp}}{\pi \cdot D}. \quad (17)$$

Ограничение на подачу сверла по предельной силе, допускаемой приводом подач сверлильного станка, составим исходя из эмпирической формулы для расчета осевой силы при сверлении [5]. Подставив в уравнение для осевой силы при сверлении вместо P_o предельную допустимую силу P_T привода подач сверлильного станка, указанную в его паспорте, получим ограничение на S по силе подачи

$$s^y \leq \frac{P_T}{10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot K_p}. \quad (18)$$

Ограничение режимов сверления по крутящему моменту, передаваемому хвостовиком сверла с конусом Морзе, получим исходя из формулы (7), эмпирической формулы для расчета осевой силы при сверлении и формулы (19) для определения максимального крутящего момента, передаваемого сопряжением конусов Морзе сверла и шпинделя сверлильного станка [4]

$$M = \mu \frac{P_o (D_k + d_k)}{4 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} (1 - 0,04 \cdot \Delta \alpha), \quad (19)$$

где μ – коэффициент трения; P_o – осевая сила сверления, н; D_k – больший диаметр конуса Морзе, м; d_k – меньший диаметр конуса Морзе, м; α – угол конусности хвостовика сверла; $\Delta \alpha \approx 10'$ – погрешность угла конусности хвостовика.

Подставив формулы для момента и осевой силы в (19), после преобразований получим ограничение на осевую оборотную подачу сверла по крутящему моменту, передаваемому его конусом Морзе

$$s^{(y_m - y_p)} \leq \mu \frac{C_p \cdot (D_k + d_k) \cdot (1 - 0,04 \Delta \alpha)}{4 \sin \frac{\alpha}{2} \cdot C_m \cdot D^{(q_m - q_p)}}. \quad (20)$$

Чтобы иметь возможность использовать наглядные и простые графические методы линейного программирования для определения реальных оптимумов n и S , нужно привести все ограничения и функцию оптимизации к линейному виду путем логарифмирования. Для упрощения записи ограничений в линейном виде примем следующие обозначения:

$$E = \ln n; F = \ln s; H_i, \quad (21)$$

где H_i – натуральный логарифм правой части i -го ограничения, не содержащей n и s .

Функцию оптимизации перед логарифмированием представим в виде

$$n \cdot s = \frac{L}{T_o} = \max. \quad (22)$$

Все ограничения (6), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (17), (18), (20) и функцию оптимизации (22) после логарифмирования и подстановки принятых обозначений объединим в систему неравенств (23).

$$\begin{aligned} I) E + y \cdot F &\leq H_1 \\ II) E + y \cdot F &\leq H_2 \\ III) E &\geq H_3 \\ IV) E &\leq H_4 \\ V) F &\geq H_5 \\ VI) F &\leq H_6 \\ VII) F &\leq H_7 \\ VIII) E &\leq H_8 \\ IX) y \cdot F &\leq H_9 \\ X) (y_m - y_p) \cdot F &\leq H_{10} \\ XI) E + F &= \max \end{aligned} \quad (23)$$

Определение оптимальных значений режимов сверления.

Так как коэффициенты перед переменными E и F в уравнении линейной функции оптимизации (после логарифмирования) равны единице, можно сделать вывод, что ее график будет представлять собой прямую линию, расположенную под углом 45° к осям координат E и F . Чем больше значение правой части функции, тем больше координаты точек пересечения ее графика с осями E и F .

Графическое определение оптимумов n и S можно выполнить следующим образом. На плоскости в системе координат E и F строят графики всех линейных ограничений из системы (23), кроме функции оптимизации (последнее выражение в системе). Эти прямые линии образуют замкнутую область, любая точка которой соответствует допустимым значениям n и S по всем ограничениям. Реальному оптимальному режиму резания будет соответствовать та точка допустимой области (включая ее границы), координаты E_{max} и F_{max} которой приведут к допустимому максимуму правой части линейной функции оптимизации. Очевидно, что это будет точка касания допустимой области с прямой линией, проведенной под углом 45° к осям координат E и F и примыкающей к этой области справа и сверху. Реальные оптимальные значения параметров режима резания определяются потенцированием

$$n_{max} = e^{E_{max}}, \quad (24)$$

$$s_{max} = e^{F_{max}}. \quad (25)$$

В качестве примера, поясняющего применение предлагаемой методики оптимизации режимов сверления, на рисунке 3 представлены графики ограничений (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX) и функции оптимизации ($E+F=\max$), полученные для следующих условий сверления: вид заготовки – толстолистовой прокат; материал заготовки – сталь 20X13; диаметр сверла – $D=14$ мм; длина сверления – $L=30$ мм; точность диаметра после обработки – по 14 квалитету; сверление выполняется на вертикально-сверлильном станке с ЧПУ модели 2P135Ф2. График ограничения X на рисунке 3 не показан, так как он расположен значительно выше других ограничений подачи и области допустимых значений E и F , представляющей собой неправильный пятиугольник, и при данных условиях не определяет область допустимых значений E и F .

Таким образом, предлагаемая методика позволяет учесть наиболее существенные характеристики технологической системы сверлильного станка и определить приемлемые режимы сверления, обеспечивающие максимально возможную производительность обработки в данных условиях.

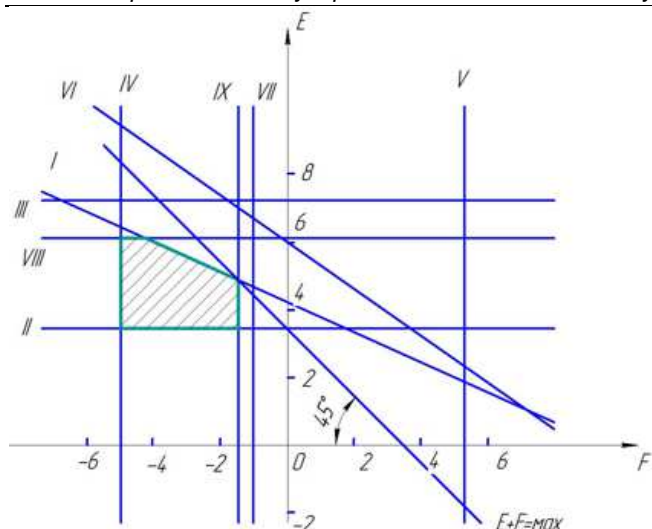


Рис. 1. Пример графического определения оптимальных режимов сверления по критерию минимальной трудоемкости

Для упрощения практического использования рассмотренной методики в приложении Excel на языке Visual Basic for Application (VBA) разработана компьютерная программа для совместного решения неравенств (23) и определения оптимальных режимов сверления без трудоемких графических построений.

Заключение. В ходе проведенных теоретических исследований получены следующие результаты:

- выявлена целесообразность и возможность оптимизации режимов сверления отверстий деталей машин методом линейного программирования;
- обоснована целесообразность использования минутной подачи в качестве объективной функции (критерия) оптимизации режимов сверления;
- разработаны оригинальные математические выражения зависимости ограничивающих параметров сверления от режимов сверления;
- разработана процедура графического определения оптимальных режимов сверления отверстий;
- выполнена апробация методики определения оптимальных режимов сверления на конкретном примере.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горанский, Г.К. Автоматизация технического нормирования станочных работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ / Г.К. Горанский, Е.В. Владимиров, Л.Н. Ламбин – М., 1970.
2. Грановский, Г.И. Резание металлов: учебник для машиностроительных и приборостроительных специальностей вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с., ил.
3. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ. – М.: Экономика, 1990. – Часть 1 и 2.
4. Семенченко, И.И. Проектирование металлорежущих инструментов / И.И. Семенченко, В.М. Матюшин, Г.Н. Сахаров. – М.: Машгиз, 1962. – 952 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001.
6. Сборник задач, упражнений и практических заданий по технологии машиностроения / В.И. Аверченков [и др.] – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 312 с.
7. Ящерицин, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов – Мн.: Высш. шк., 1990. – 512 с.: ил.

Материал поступил в редакцию 04.12.13

MEDVEDEV O.A., FU CHAO Choice of criterion of optimization and restrictions of the mode of drilling of openings with spiral drills

The technique of determining the optimum modes of drilling twist drills. By analyzing the characteristics of the drilling identified a convenient and objective criterion optimization, the most important technical limitations drilling modes and developed a mathematical model of the process of drilling. Application of this method can increase the reliability and efficiency of drilling operations.

УДК 539.21

Остриков О.М., Иноземцева Е.В.

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА, ПОДВЕРГНУТОГО ОДНООСНОМУ РАСТЯЖЕНИЮ ИЛИ СЖАТИЮ, ПРИ НАЛИЧИИ В НЕМ УПРУГОГО ЛИНЗОВИДНОГО ДВОЙНИКА

Введение. Упругое двойникование было открыто Р.И. Гарбером при исследовании колец Ньютона в процессе деформирования

выпуклой линзой пластины из двойникового материала [1]. Отличительной особенностью упругих механических двойников

Остриков Олег Михайлович, к.ф.-м.н., зав. кафедрой «Инженерная графика» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого.

Иноземцева Елена Владимировна, магистр технических наук, ассистент кафедры «Инженерная графика» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого.

Беларусь, ГГТУ им. П.О. Сухого, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.