

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИИ ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ С УЧЁТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Верещетин П.П., Гаврилова Е.Н., Лукьянов А.Д., Щербаков В.М.
(ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Рассматривается вопрос оптимизации процесса сверления глубоких отверстий под управлением адаптивной системы с контролем крутящего момента на инструменте.

Ключевые слова: *глубокое сверление, оптимизация, управление.*

Введение

Оптимизация процессов обработки всегда была важной задачей для машиностроительного производства. Практика показывает, что целенаправленное, основанное на корректной математической модели определение оптимальных режимов работы оборудования всегда дает выигрыш по сравнению с эмпирическим, пробным назначением режимов.

Результаты по определению оптимальных режимов сверления глубоких отверстий на специализированном оборудовании, представленные в данной работе, являются следствием обобщения многолетних экспериментальных и теоретических исследований по глубокому сверлению труднообрабатываемых материалов, проведенных коллективом лаборатории «Динамика и диагностика технических систем» ДГТУ и отделом главного технолога ОАО «Калужский турбинный завод».

1. Формулировка проблемы

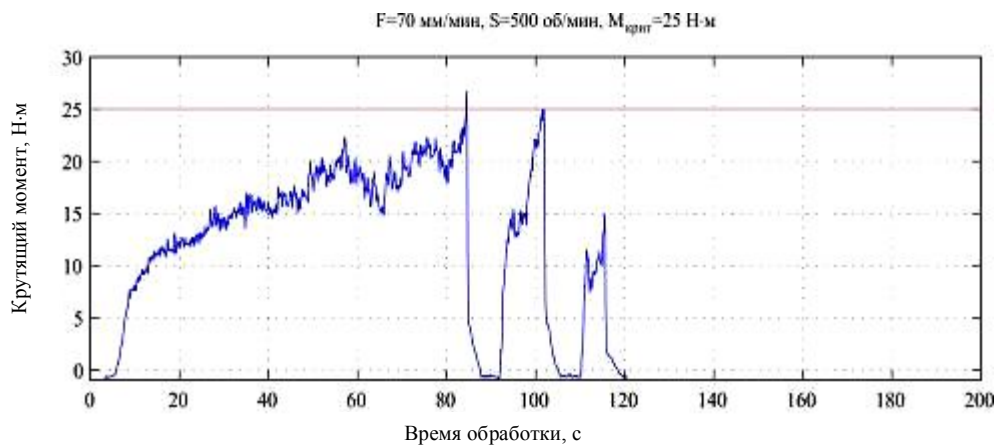
Рассматривается задача оптимизации режимов операции глубокого сверления труднообрабатываемых материалов при условии, что сверление производится с ограничением величины крутящего момента, действующего на сверло, то есть по достижении крутящим моментом некоторого предельного значения происходит вывод инструмента для удаления стружки, а затем сверление продолжается.

Типичные зависимости величины крутящего момента от времени при выполнении операции сверления с вышеуказанным ограничением даны на рис.1.

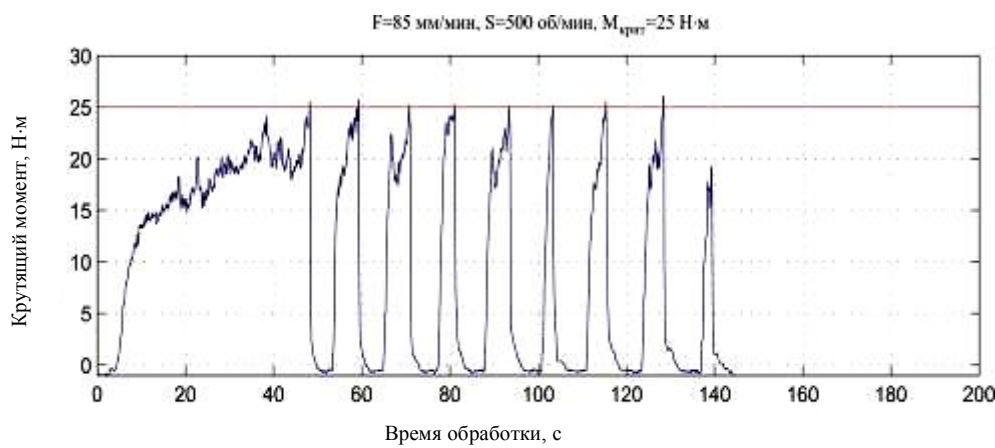
Графики получены при сверлении одного и того же образца (титан марки BT5) одним и тем же твёрдосплавным сверлом диаметром 16.4 мм (производство фирмы «Guering») с подводом масляной СОЖ через каналы в сверле. Скорость вращения инструмента 500 об/мин. Для графика а) величина скорости вертикальной подачи составляет 70 мм/мин, а для графика б) - 85 мм/мин. Величина крутящего момента, по достижению которого осуществлялся вывод инструмента, $M_{крит} = 25 \text{ Н*м}$. Общее время обработки в первом случае составляет 120 секунд, а во втором - 145 секунд.

Из графиков видно, что при сверлении на более высокой скорости подачи, крутящий момент (определяемый вкладом силы резания) изначально получается более высоким, что приводит к более раннему срабатыванию защиты по крутящему моменту.

Таким образом, получается, что при увеличении скорости подачи время сверления не уменьшается, а за счет большего количества выводов сверла, наоборот, увеличивается.



а)



б)

Рис.1. Зависимости крутящего момента от времени для сверления на различных режимах.

В то же время, представляется очевидным, что при уменьшении скорости подачи время сверления будет стремиться к бесконечности. Таким образом, существование оптимума по времени обработки в зависимости от величины скорости подачи несомненно. Этим и определяется возможность постановки и получения решения данной оптимизационной задачи.

Таким образом, целью работы является определение режимов обработки (в первую очередь – величины вертикальной подачи), при которых минимизируется время сверления одного отверстия.

2. Линеаризация типовой характеристики зависимости крутящего момента при глубоком сверлении от времени и от координаты

На графиках рис.2 сделаны следующие обозначения:

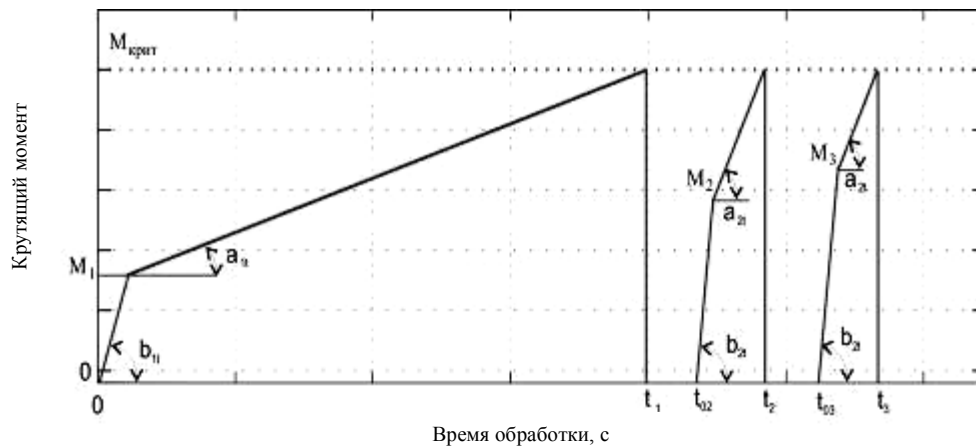
– $M_{крит}$ - критический момент, при котором происходит вывод сверла из отверстия для удаления стружки;

– M_1 - крутящий момент, определяемый силами резания. Достижение этой величины происходит после окончания врезания сверла в деталь, но при условии, что движение стружки по стружкоотводящей канавке ещё не оказывает влияния на величину крутящего момента;

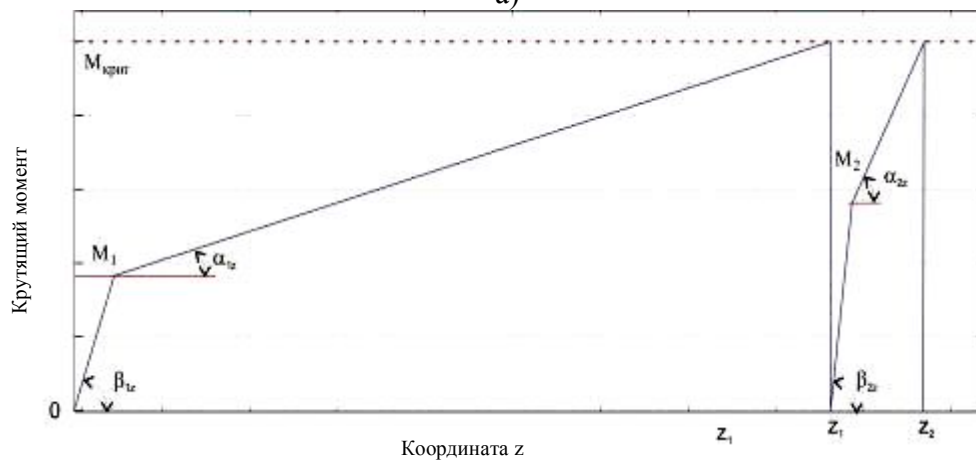
– β_{1t} и β_{1z} - угловые коэффициенты нарастания величины крутящего момента в процессе врезания инструмента в заготовке для временной и координатной зависимостей для первого заглабления;

– α_{1t} и α_{1z} - угловые коэффициенты нарастания величины крутящего момента в процессе сверления, определяемые стружкой, для временной и координатной зависимостей для первого заглабления;

– β_{2t} и β_{2z} - угловые коэффициенты нарастания величины крутящего момента в процессе сверления, определяемые стружкой, для временной и координатной зависимостей для последующих заглаблений;



а)



б)

Рис. 2. Кусочно-линеаризованные зависимости крутящего момента от времени (а) и координаты сверления (б).

– α_{2t} и α_{2z} - угловые коэффициенты нарастания величины крутящего момента в процессе врезания инструмента в заготовку для временной и координатной зависимостей для последующих заглаблений;

– M_2 и M_3 - крутящие моменты, при которых происходит "излом" кривой нарастания крутящего момента при последующих заглаблениях, свидетельствующий об окончании врезания;

– t_1 , t_2 , t_3 и т. д. - время окончания первого и последующих заглаблений соответственно;

– t_{02} , t_{03} и т. д. - время начала второго и последующих заглаблений соответственно;

– z_1, z_2 и т. д. - координата окончания первого и последующих заглаблений соответственно.

Общее время, затрачиваемое на сверление отверстия, может быть записано как

$$T = t_1 + \sum_{i=2}^n (t_i - t_{0i}) + (t_{0n} - t_{i-1}), \quad (1)$$

при этом слагаемые $t_i - t_{0i}$ описывают время текущего заглабления, а слагаемые $t_{0i} - t_{i-1}$ - время вспомогательных перемещений. Исходя из зависимостей, приведённых на графиках рис.2, можно рассчитать составляющие формулы (1):

$$t_1 = z_0 / V_z + (M_{\text{крут}} - M_1) / \alpha_{1t};$$

$$t_2 - t_{02} = M_2 / \beta_{2t} + (M_{\text{крут}} - M_2) / \alpha_{2t}; \quad (2)$$

...

$$t_n - t_{0n} = M_n / \beta_{nt} + (M_{\text{крут}} - M_n) / \alpha_{nt};$$

$$t_{0i} - t_{i-1} = 2 \cdot z_{i-1} \cdot V_f, \quad (3)$$

где V_f - скорость вспомогательных движений.

В первом приближении величина составляющей крутящего момента M_1 зависит от величины оборотной подачи линейно, что при постоянной частоте вращения сверла приводит к линейной зависимости от скорости подачи:

$$M_1(V_z) = \mu \cdot V_z. \quad (4)$$

Величина коэффициента μ для конкретных условий сверления определяется экспериментально. Таким образом, формула для времени первого заглабления принимает вид:

$$T_i = z_0 / V_z + (M_{\text{крут}} - \mu \cdot V_z) / \alpha_{1t}. \quad (5)$$

В этом случае величина первого заглабления:

$$z_1 = T \cdot V_z = z_0 + (M_{\text{крут}} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z / \alpha_{1t}. \quad (6)$$

Для последующих заглаблений величина крутящих моментов M_2, M_3 и т.д. определяется как

$$M_i = M_1 + \Delta M_i(z_i), \quad (7)$$

где $\Delta M_i(z_i)$ - добавка к крутящему моменту, обусловленная вращением сверла в просверленном отверстии. Наличие этой добавки определяется рядом физических процессов: трением сверла о стенки отверстия, гидродинамическим сопротивлением вращению сверла в смазочно-охлаждающей жидкости и т.д., а величина в первом приближении является линейной функцией от глубины отверстия:

$$\Delta M_i(z_i) = \nu \cdot z_i. \quad (8)$$

С учетом изложенного выше запишем время и координату второго:

$$T_2 = (M_{\text{крут}} - M_2) / \alpha_{2t} = (M_{\text{крут}} - \mu \cdot V_z - \nu \cdot z_1) / \alpha_{2t}; \quad (9)$$

$$z_2 = z_1 + (M_{\text{крут}} - \mu \cdot V_z - \nu \cdot z_1) \cdot V_z / \alpha_{2t} \quad (10)$$

и последующих заглаблений:

$$T_i = (M_{\text{крут}} - \mu \cdot V_z - \nu \cdot z_{i-1}) / \alpha_{2t}; \quad (11)$$

$$z_i = z_{i-1} + (M_{\text{крут}} - \mu \cdot V_z - \nu \cdot z_{i-1}) \cdot V_z / \alpha_{2t}. \quad (12)$$

Формулы (11) представляют собой рекуррентные зависимости. В то же время, для решения задачи оптимизации желательно иметь выражения для времени и координаты в явном виде. Рассмотрим последовательно выражения для z_2 , z_3 и исходя из них получим общий вид формулы для z_i :

$$z_2 = z_1 + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z - \nu \cdot z_1) \cdot V_z}{\alpha_{2t}} = \left(z_0 + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z}{\alpha_{1t}} \right) \times \left(1 - \frac{\nu \cdot z_2 \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right) + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z}{\alpha_{2t}}; \quad (13)$$

$$z_3 = \left(z_0 + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z}{\alpha_{1t}} \right) \cdot \left(1 - \frac{\nu \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right)^2 + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z}{\alpha_{2t}} + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \cdot \left(1 - \frac{\nu \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right); \quad (14)$$

$$z_i = \left(z_0 + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z}{\alpha_{1t}} \right) \cdot \left(1 - \frac{\nu \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right)^{i-1} + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \cdot \sum_{j=0}^{i-2} \left(1 - \frac{\nu \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right)^j. \quad (15)$$

Последнее слагаемое в выражении для z_i представляет собой сумму членов ряда геометрической прогрессии с первым членом $a_1 = 1$ и знаменателем $q = \left(1 - \nu \cdot V_z / \alpha_{2t} \right)$:

$$S_n = \frac{a_1 \cdot q^n - a_1}{q - 1},$$

поэтому выражение можно представить в виде:

$$z_i = \left(z_0 + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z}{\alpha_{1t}} \right) \cdot \left(1 - \frac{\nu \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right)^{i-1} + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z}{\nu} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{\nu \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right)^{i-1} \right) \quad (16)$$

или в виде:

$$z_i = \left(z_0 + (M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot \left(\frac{V_z}{\alpha_{1t}} - \frac{1}{\nu} \right) \right) \times \left(1 - \frac{\nu \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right)^{i-1} + \frac{M_{крит} - \mu \cdot V_z}{\nu}. \quad (17)$$

С учетом времени вспомогательных перемещений общее время на выполнение n заглаблений:

$$T(n) = \frac{Z}{V_z} + \frac{2}{V_f} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} z_i + \frac{Z}{V_z} = Z \cdot \left(\frac{1}{V_z} + \frac{1}{V_f} \right) + \frac{2}{V_f} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} z_i. \quad (18)$$

Число заглаблений n определяется из равенства:

$$Z = \left(z_0 + (M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot \left(\frac{V_z}{\alpha_{1t}} - \frac{1}{\nu} \right) \right) \times \left(1 - \frac{\nu \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right)^{n-1} + \frac{M_{крит} - \mu \cdot V_z}{\nu} \quad (19)$$

как ближайшее целое в большую сторону для числа:

$$n = 1 + \left[\ln \left(Z - \frac{M_{крит} - \mu \cdot V_z}{\nu} \right) - \ln \left(z_0 + (M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot \left(\frac{V_z}{\alpha_{1t}} - \frac{1}{\nu} \right) \right) \right] / \ln \left(1 - \frac{\nu \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right). \quad (20)$$

Несмотря на то, что в формуле (18) используется округление числа n , рассчитанного по формуле (19) в большую сторону, время $T(n)$ будет представлять собой точную оценку, поскольку в нем для оценки времени сверления с рабочей скоростью V_z используется заданная глубина просверливаемого отверстия Z .

Подстановка в (18) выражения для z_i дает следующую формулу:

$$T(n) = Z \cdot \left(\frac{1}{V_z} + \frac{1}{V_f} \right) + \frac{2}{V_f} \cdot \left(z_0 + \frac{(M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot V_z}{\alpha_{1t}} \right) + \frac{2}{V_f} \cdot \sum_{i=2}^{n-1} \left(\left(z_0 + (M_{крит} - \mu \cdot V_z) \cdot \left(\frac{V_z}{\alpha_{1t}} + \frac{1}{\nu} \right) \right) \times \left(1 - \frac{\nu \cdot V_z}{\alpha_{2t}} \right)^{i-1} + \frac{M_{крит} - \mu \cdot V_z}{\nu} \right). \quad (21)$$

В формуле (21) первое слагаемое отвечает за уменьшение времени сверления с увеличением как скорости подачи, так и скорости вспомогательных движений, второе слагаемое определяет время, затраченное на первое заглабление, а последующие слагаемые отвечают за увеличение времени сверления из-за увеличения числа выводов инструмента из отверстия по превышению крутящего момента.

3. Определение оптимальных значений скорости и подачи

Дальнейшее аналитическое исследование (18) с целью оптимизации времени сверления за счет определения оптимального значения V_z осложняется существенно нелинейным видом частной производной от (18) по ∂V_z . В связи с этим построение оптимизационной кривой, определяющей зависимость между скоростью подачи V_z и временем на обработку одного отверстия T , производилось численно, с учетом различий протекания процесса глубокого сверления на первом и последующих заглаблениях.

Результат численного расчета оптимизационной кривой по формулам (13)-(18) отражен на рис.3. Расчет проведен для твердосплавного сверла диаметром 16 мм с внутренней подачей СОЖ при величине крутящего момента $M_{крит} = 25 \text{ Н*м}$.

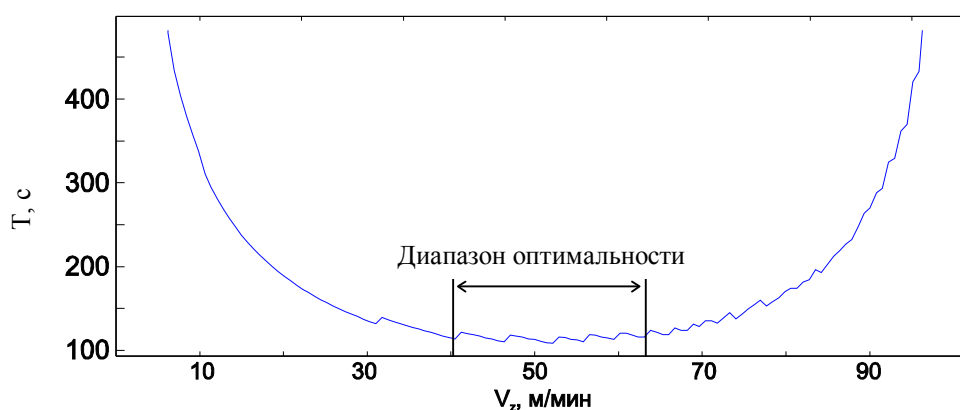


Рис.3. Зависимость времени сверления T от скорости вертикальной подачи V_z для фиксированной уставки по крутящему моменту $M_{крит} = 25 \text{ Н*м}$.

Приведённая зависимость и качественно, и количественно соответствует зависимости времени сверления от скорости вертикальной подачи, полученной при сверлении трубных досок из материалов ВТ-5 и 08Х18Н10Т, а также 09Г2С, плакированной титаном на координатно-сверлильных и радиально-сверлильных станках, оборудованных адаптивными системами управления сверления глубоких отверстий, разработанными авторами данной статьи и эксплуатируемыми на ОАО "КТЗ".

Полученная зависимость имеет большое количество локальных минимумов, наложенных на широкий глобальный минимум, которые связаны с дискретным процессом формирования дополнительных выводов сверла при увеличении скорости вертикальной подачи. Именно их наличие и делает затруднительным аналитический анализ при поиске оптимального значения скорости.

С технологической точки зрения, при назначении режимов скорость V_z следует выбирать в районе второго - третьего локального минимума в левой части глобального, что обеспечит повышение стойкости инструмента за счет снижения оборотной подачи при сохранении производительности.

Заключение

В работе рассмотрены особенности оптимизации процесса сверления глубоких отверстий под управлением адаптивной системы, осуществляющей вывод инструмента из отверстия по достижению критической величины крутящего момента.

Предложена упрощенная «геометрическая» модель процесса глубокого сверления, основанная на записях реальных зависимостей крутящего момента и координаты вертикальной подачи при глубоком сверлении.

Получен ряд аналитических выражений, описывающих величины единичных заглаблений при глубоком сверлении и позволяющих вычислить соответствующие длительности заглаблений.

На основе проведенного анализа произведен численный расчет и получена зависимость времени сверления от величины вертикальной подачи.

Сформулированы рекомендации по назначению режима обработки исходя из полученной оптимизационной кривой.