

УДК 621.9: 658.5

В.А. Богуславский, канд. техн. наук, проф., Т.Г. Ивченко, канд. техн. наук, доцент,

В.В. Польченко, доцент, М.В. Кондрашов, студент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [tm@mech.dgutu.donetsk.ua](mailto:tm@mech.dgutu.donetsk.ua)

## ВЛИЯНИЕ СОТС НА СЕБЕСТОИМОСТЬ ОПЕРАЦІЙ СВЕРЛЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

С использованием критерия минимальной себестоимости определены оптимальные режимы сверления нержавеющей стали X18H9T. Установлены аналитические зависимости оптимальных подач и скоростей резания от параметров процесса сверления. Данна количественная оценка возможностей снижения себестоимости при сверлении за счет использования смазочно-охлаждающих технологических сред.

**Ключевые слова:** сверление, оптимизация, себестоимость, ограничения, охлаждение.

### 1. Введение

Высокая трудоемкость и низкая себестоимость обработки специальных марок нержавеющих сталей, широко распространенных в деталях и узлах современных машин, обуславливает актуальность представленных в работе исследований по обеспечению минимальной себестоимости сверления с использованием смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС).

Наиболее успешно задача достижения минимальной себестоимости решается с использованием различных методов оптимизации параметров при механической обработке. В настоящее время для оптимизации режимов резания в случае нелинейной целевой функции, каковой является себестоимость обработки деталей, применяются методы нелинейного программирования, одним из которых является метод геометрического программирования (МГП) [1]. Использования этого метода позволяет осуществлять одновременную оптимизацию скорости резания и подачи с учетом действующих при резании ограничений по критерию минимальной себестоимости.

Методика оптимизации режимов резания с использованием МГП, представленная в работах [2, 3], дает аналитическое решение для определения режимов резания при черновом и чистовом точении. Представляет интерес дальнейшее развитие этой методики применительно к другим видам обработки, и прежде всего - к сверлению, которое является наиболее распространенным методом обработки отверстий.

Низкая теплопроводность и высокая прочность нержавеющих сталей способствует повышению температуры и сил резания в зоне обработки. Необходимость использования СОТС с целью снижения температуры резания и повышения производительности обоснована многочисленными исследованиями [4, 5], однако они выполнены для токарной обработки и не могут быть распространены на сверление.

Задача оптимизации режимов резания при сверлении нержавеющих сталей с использованием СОТС решена методом линейного программирования на основе критерия максимальной производительности [6]. Представляет интерес решение этой задачи методами нелинейного программирования по критерию минимальной себестоимости обработки.

Цель представляемой работы – с использованием МГП разработать методику определения оптимальных режимов резания, обеспечивающих минимальную себестоимость сверления с учетом действия СОТС.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Для решения задачи обеспечения минимальной себестоимости при сверлении в качестве критерия оптимальности принимается переменная часть себестоимости, зависящая от режимов резания:

$$C_o = A_{t_o} + A_{t_c} t_o / T + A_u t_o / T, \quad (1)$$

где  $A$  - себестоимость станкоминуты;  $A_u$  – стоимость одного периода стойкости инструмента  $T$ ;  $t_o$ - основное время обработки;  $t_c$  - время смены инструмента.

Для определения целевой функции используем известную взаимосвязь стойкости  $T$  с параметрами сверления [6]:

$$T = \left( C_V K_V D^{q_v} / V S^{y_v} \right)^{1/m}, \quad (2)$$

где  $C_V$  – коэффициент,  $m$ ,  $y_v$ ,  $q_v$  – показатели, характеризующие степень влияния стойкости  $T$ , подачи  $S$ , диаметра  $D$  на скорость резания  $V$ .

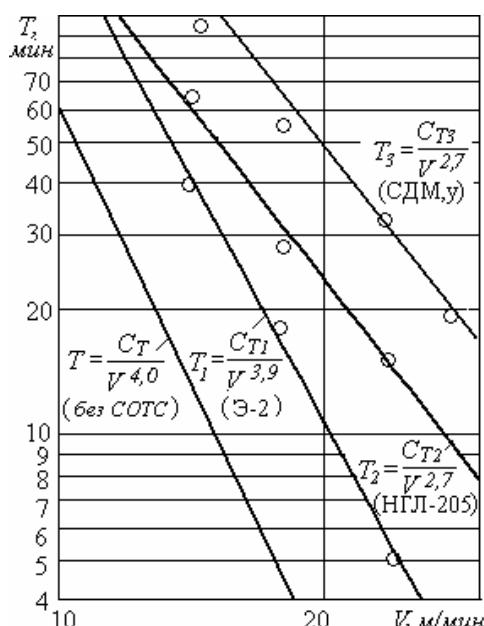


Рис. 1. Графики зависимости стойкости сверл  $T$  от скорости резания  $V$  для различных СОТС

$$T_3 = 1,531 \cdot 10^5 / V^{2,7}.$$

Снижение температуры резания при обработке с использованием в качестве СОТС эмульсоля Э-2 достигается преимущественно за счет охлаждающего эффекта СОЖ и обеспечивает минимальное повышение стойкости  $T_1$  в сравнении со стойкостью  $T$  при обработке без СОТС -. При использовании эмульсоля НГЛ-205, состоящего из масляного раствора сульфоната натрия и пассивирующих добавок водорастворимых ингибиторов коррозии - нитрита натрия и тринатрийфосфата, к охлаждающему эффекту добавляется эффект смазывающий, что усиливает снижение температуры и повышение стойкости.

ние стойкости  $T_2$ . Наибольший эффект снижения температуры наблюдается при использовании эмульсона СДМ<sub>у</sub>, представляющего собой безводную систему содержащую масло, сульфонат натрия, водорастворимые ингибиторы коррозии и небольшое количество (до 3 %) дисульфида молибдена (в качестве противоизносной присадки), прошедшего ультразвуковую обработку. Наличие дисульфида молибдена существенно повышает смазывающее действие СОЖ, что и обеспечивает максимальное снижение температуры резания и повышения стойкости инструмента  $T_3$ .

С использованием результатов экспериментальных исследований приняты следующие зависимости скорости резания  $V$  от условий обработки:

при обработке без охлаждения

$$V = 0,80D^{0,75}/T^{0,25}S^{0,85}. \quad (3)$$

при обработке с использованием СОТС (эмulsion Э-2 – скорость резания  $V_1$ , эмульсон НГЛ-2О5 – скорость резания  $V_2$ , эмульсон СДМ<sub>у</sub> – скорость резания  $V_3$ )

$$V_1 = 1,06D^{0,75}/T^{0,26}S^{0,85}; V_2 = 1,84D^{0,75}/T^{0,37}S^{0,85}; V_3 = 2,51D^{0,75}/T^{0,37}S^{0,85}. \quad (4)$$

Основные ограничения при сверлении, рассматриваемые в представленной работе: ограничения по прочности и жесткости режущего инструмента [6]:

$$\sigma/K_S \geq 1.73C_M K_M D^{q_M} S^{y_M} /W; K_I EI/L^2 \geq C_P K_P S^{y_p} D^{q_p}, \quad (5)$$

где  $C_M$ ,  $K_M$ ,  $q_M$ ,  $y_M$  – коэффициенты и показатели степеней, характеризующие влияние диаметра сверла и подачи на крутящий момент при сверлении;  $\sigma$  – временное сопротивление материала сверла на разрыв;  $K_S \approx 1.5\dots 2.0$  – коэффициент запаса прочности;  $W=0.02D^3$  – момент сопротивления сверла;  $C_P$ ,  $K_P$ ,  $q_P$ ,  $y_P$  – коэффициенты и показатели степеней, характеризующие влияние диаметра сверла и подачи на осевую силу при сверлении;  $K_I \approx 2.46$  – коэффициент устойчивости;  $L$  – длина вылета сверла;  $E$  – модуль упругости материала сверла;  $I = 0.039D^4$  – момент инерции сверла;.

При решении задачи двухпараметрической оптимизации, то есть определения оптимальных значений скорости резания  $V$  и подачи  $S$  с заданной глубиной резания  $t$  в условиях однопроходной обработки [3]:

$$C = V^{-1}S^{-1} + MV^{k_V}S^{k_S}, \quad (6)$$

где  $M = (t_c + A_u/A)(1/C_V K_V D^{q_V})^{1/m}$ ;  $k_V = 1/m - 1$ ;  $k_S = y_V/m - 1$ .

Ограничения по прочности и жесткости при оптимизации режимов сверления с использованием МГП представляются в виде:

$$C_i S^{y_i} \leq 1, \quad (7)$$

где для ограничений по прочности  $C_1$  и по жесткости  $C_2$  режущего инструмента коэффициенты  $C_i$  и параметры  $y_i$  выражаются следующим образом:

$$C_1 = 1.73 C_M K_M D^{q_M} K_S / \sigma W ; y_1 = y_M; C_2 = C_P K_P D^{q_p} L^2 / K_I EI ; y_2 = y_p$$

Согласно МГП на первом этапе оптимизации скорости резания  $V$  и подачи  $S$  решается задача поиска экстремума целевой функции, или максимума функции  $V(W)$ :

$$V(W) = (1/W_{01})^{W_{01}} (M/W_{02})^{W_{02}} C_i^{W_{11}}, \quad (8)$$

где  $W_{01}$ ,  $W_{02}$ ,  $W_{11}$ - коэффициенты весомостей, определяемые из системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} W_{01} + W_{02} = 1; \\ -W_{01} + k_V W_{02} = 0; \\ -W_{01} + k_S W_{02} + y_r W_{11} = 0; \end{cases} \quad W_{01} = \frac{k_V}{1+k_V}; \quad W_{02} = \frac{1}{1+k_V}; \quad W_{11} = \frac{W_{01}(1+k_S) - k_S}{y_r}. \quad (9)$$

С учетом преобразований  $W_{01} = 1 - m$ ,  $W_{02} = m$ ,  $W_{11} = (1 - y_v)/y_i$ .

Система линейных уравнений для определения оптимальных режимов резания:

$$\begin{cases} V(W)W_{01} = V^{-1}S^{-1}; \\ V(W)W_{02} = MV^{k_V} S^{k_S}. \end{cases} \quad (10)$$

Общие решения этой системы для определения оптимальной подачи  $S_o$  и скорости резания  $V_o$  при заданных ограничениях  $C_i$ :

$$S_{oi} = C_i^{-1/y_i}; \quad V_{oi} = (m/(1-m)M)^m S_{oi}^{y_i}, \quad (11)$$

В окончательном виде для сверления оптимальные подачу  $S_o$  и скорость резания  $V_o$  определяем следующим образом:

$$S_o = \begin{cases} \left( \frac{\sigma W}{1.7 C_M K_M D^{q_M} K_S} \right)^{1/y_M}, & \frac{L}{D} \leq K_{Lo}; \\ \left( \frac{K_I EI}{C_P K_P D^{q_p} L^2} \right)^{1/y_p}, & \frac{L}{D} \geq K_{Lo}; \end{cases} \quad V_o = \left( \frac{m}{1-m} \right)^m \frac{C_V K_V D^{q_v}}{(t_c + A_u/A)^m S_o^{y_v}}. \quad (12)$$

где  $K_{Lo}$  - граничное значение отношения длины сверла к диаметру, для которого необходимо учитывать ограничение по жесткости:

$$K_{Lo} = \left( \frac{0,039 E K_I}{C_P K_P D^{q_p} - 2} \right)^{0.5} \left( \frac{C_M K_M D^{q_M} - 3 K_S}{0,012 \sigma} \right)^{y_p/2 y_M}.$$

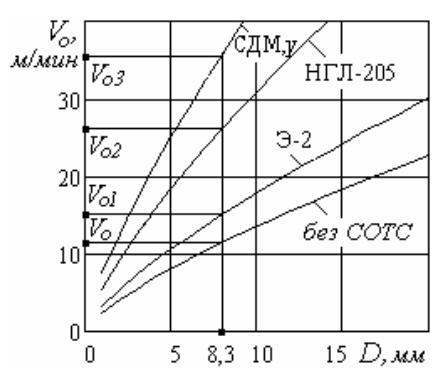


Рис. 2. Графики зависимости оптимальной скорости резания от диаметра сверла для различных СОТС

$$V_{o3(\text{СДМ},\text{у})} = 36,8 \text{ м/мин.}$$

На основании полученных аналитических зависимостей оптимальных значений подач и скоростей резания от параметров сверления (12), для любых условий обработки могут быть рассчитаны оптимальные режимы резания, обеспечивающие минимальную себестоимость.

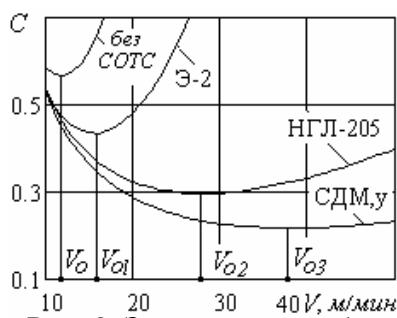


Рис. 3. Зависимость себестоимости сверления от скорости резания для различных

сравнении обработкой без СОТС в 1,3 раза.

При использовании эмульсола НГЛ-205 с охлаждающим и смазывающим эффектом себестоимость обработки снижается в 1,9 раза. Наибольший эффект снижения себестоимости (в 2,6 раза) наблюдается при использовании эмульсола СДМ,у с максимальным смазывающим эффектом.

## Выводы

Разработана методика оптимизации режимов резания методом геометрического программирования по критерию минимальной себестоимости при сверлении с использованием смазочно-охлаждающих технологических сред. Определены оптимальные режимы сверления нержавеющей стали X18H9T.

Установлены аналитические зависимости оптимальных значений подач и скоростей резания от параметров процесса сверления, позволяющие рассчитывать оптимальные режимы резания, обеспечивающие минимальную себестоимость.

На основании экспериментальных исследований установлено влияние различных смазочно-охлаждающих технологических сред на стойкостные зависимости при свер-

Графики зависимости оптимальных скоростей резания  $V_o$  от диаметра сверла при использовании различных СОТС, представленные на рис. 2, позволяют регламентировать оптимальные скорости сверления.

Оптимальные режимы резания при заданных условиях обработки (обрабатываемый материал X18H9T, диаметр сверла из быстрорежущей стали Р18  $D = 8,3$ мм) - подача  $S_o = 0,15$ мм/об, скорость резания:

при обработке без применения СОТС  $V_o = 11,8$ м/мин,

при обработке с использованием СОТС:  $V_{o1(\mathcal{E}-2)} = 15,5$ м/мин,  $V_{o2(\text{НГЛ}-205)} = 26,9$ м/мин,

Графики зависимости себестоимости сверления от скорости резания при использовании различных СОТС представлены на рис. 3.

Из графика следует, что минимальная себестоимость имеет место при оптимальных режимах резания.

При обработке без СОТС себестоимость обработки наибольшая, а оптимальная скорость резания имеет наименьшую из всех сравниваемых вариантов.

Использование в качестве СОТС эмульсола Э-2 с преимущественно охлаждающим эффектом, позволяет снизить себестоимость обработки в

лении, что позволило выполнить количественную оценку возможностей снижения себестоимости за счет их использования.

Разработанная методика может быть использована для любых видов обработки.

**Список литературы:**

1. Оптимизация и управление процессом резания: / О.С. Кроль, Г.Л. Хмеловский. – К.: УМК ВО, 1991. – 140с.
2. Ивченко Т.Г. Использование метода геометрического программирования для расчета оптимальных режимов резания при точении / Т.Г. Івченко // Научный вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА, 2011. – №1 (5 Е). – С. 47–52.
3. Івченко Т.Г. Учет температурных ограничений при оптимизации режимов резания методом геометрического программирования / Т.Г. Івченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2014. Вып. 1(47). – С.144-148.
4. Зантур Сахби. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых материалов с учетом температурных ограничений / Зантур Сахби, В.А. Богуславский, Т.Г. Івченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2010. Вып. 39. – С.77-84.
5. Богуславский В.А. Повышение производительности обработки труднообрабатываемых материалов с применением смазочно-охлаждающих жидкостей / В.А. Богуславский, Т.Г. Івченко, Зантур Сахби // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. - Донецьк, ДонНТУ, 2010. Випуск 7(166).- С.9-16.
6. Bogouslavskiy Vadim, Ivchenko Tatiana, Poltchenko Virtor. Optimisation of cutting regimes at drilling of stainless strip X18H9T/ Les problemes contemporains de la technosphère et de la formation des cadres d'ingénieurs // Recueil des exposés des participants de la VI Conference internationale scientifique et methodique sur l'ile de Djerba du 11 au 18 octobre 2012. – Donetsk: UNTD, 2012. P.238-243.

Поступила в редколлегию 26.12.2014

**V.A. Bogouslavskiy, T.G. Ivchenko, V.V. Poltchenko, M.V. Kondrachov**

**INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL CUTTING FLUID ON THE COST PRICE OF OPERATIONS  
OF DRILLING OF STAINLESS STEELS**

*With the use of the of minimum prime price criterion the drilling optimum regims of stainless steel X18H9T are certain. Analytical dependences of the optimum feeds and cutting speeds from the parameters of drilling are set. The quantitative estimation of possibilities of prime price decline at drilling due to the use cutting fluids is given.*

**Key words:** drilling, optimization, prime price, limitations, cooling

**В.О. Богуславський, Т.Г. Івченко, В.В. Польченко, М.В. Кондряшов**

**ВПЛИВ МОТС НА СОБІВАРТІСТЬ ОПЕРАЦІЙ СВЕРДЛЕННЯ НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ**

*З використанням критерію мінімальної собівартості визначені оптимальні режими свердлення неіржавіючої сталі X18H9T. Встановлені аналітичні залежності оптимальних подач і швидкостей різання від параметрів процесу свердління. Дано кількісна оцінка можливостей зниження собівартості під час свердлення за рахунок використання змащувально-охолоджуючих технологічних середовищ.*

**Ключові слова:** свердлення, оптимізація, собівартість, обмеження, охолодження