

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.dgtu.donetsk.ua](mailto:tm@mech.dgtu.donetsk.ua)

## ВЛИЯНИЕ СОТС НА СЕБЕСТОИМОСТЬ ОПЕРАЦИЙ 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. Дана 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 нержавеющей стали, 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]. Использование 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 нержавеющей стали 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 нержавеющей стали 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:

$$C_o = At_o + At_c t_o / T + A_u t_o / T, \quad (1)$$

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  $V$ .

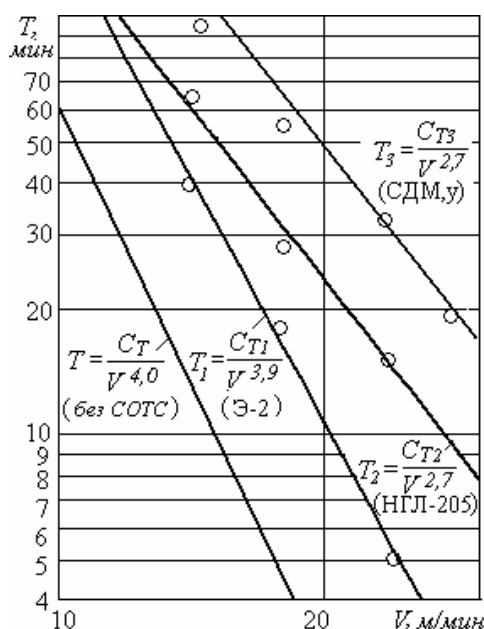


Рис. 1. Графики зависимости стойкости сверла  $T$  от скорости резания  $V$  для различных СОТС

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

Снижение температуры резания при обработке с использованием в качестве СОТС эмульсола 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 эмульсола НГЛ-205, состоящего из масляного раствора сульфата натрия и пассивирующих добавок водорастворимых ингибиторов коррозии – нитрита натрия и тринатрийфосфата, к охлаждающему эффекту добавляется эффект смазывающий, что усиливает снижение температуры и повыше-

Результаты стойкостных испытаний сверл, представленные на рис.1, позволили экспериментально определить степень влияния скорости резания на стойкость инструмента в условиях обработки с использованием различных СОТС: эмульсолов Э-2; НГЛ-205; СДМ,у. Условия проведения экспериментов: обрабатываемый материал – сталь Х18Н9Т; инструментальный материал – быстрорежущая сталь Р18, диаметр сверла  $D = 8,3$ мм. В результате обработки экспериментальных данных установлены следующие зависимости стойкости от скорости резания:

при обработке без охлаждения:

$$T = 5,883 \cdot 10^5 / V^4;$$

при обработке с эмульсолом Э-2:

$$T_1 = 1,166 \cdot 10^6 / V^{3,9};$$

при обработке с эмульсолом НГЛ-205:

$$T_2 = 7,787 \cdot 10^4 / V^{2,7};$$

при обработке с эмульсолом СДМ,у:

ние стойкости  $T_2$ . Наибольший эффект снижения температуры наблюдается при использовании эмульсола СДМ,у, 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 (эмульсол Э-2 – скорость резания  $V_1$ , эмульсол НГЛ-205 – скорость резания  $V_2$ , эмульсол СДМ,у – 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]:

$$\sigma / K_S \geq 1,73 C_M K_M D^{q_M} S^{y_M} / W ; K_I EI / L^2 \geq C_P K_P S^{y_P} D^{q_P} , \quad (5)$$

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]:

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

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:

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

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:

$$S_o = \begin{cases} \left( \frac{\sigma W}{1.73 C_M K_M D^{q_M} K_S} \right)^{1/y_M}, & \frac{L}{D} \leq K_{Lo}; \\ \left( \frac{K_I EI}{C_P K_P D^{q_P} L^2} \right)^{1/y_P}, & \frac{L}{D} \geq K_{Lo}; \end{cases} \quad V_o = \left( \frac{m}{1-m} \right)^m \frac{C_V K_V D^{q_V}}{(t_c + A_u/A)^m S_o^{y_v}}. \quad (12)$$

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

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

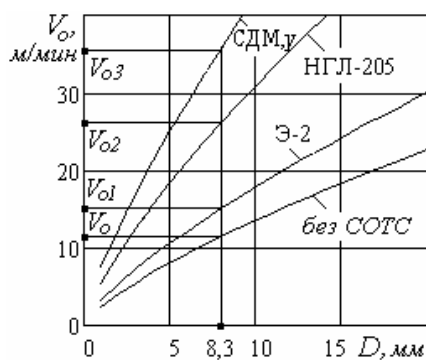


Рис. 2. Графіки залежності оптимальної швидкості різання від діаметра сверла для різних СОРС

$V_{o3(СДМ,у)} = 36,8 \text{ м/мин.}$

На основі отриманих аналітичних залежностей оптимальних значень подач і швидкостей різання від параметрів сверлення (12), для будь-яких умов обробки можуть бути розраховані оптимальні режими різання, забезпечуючі мінімальну себестоимость.

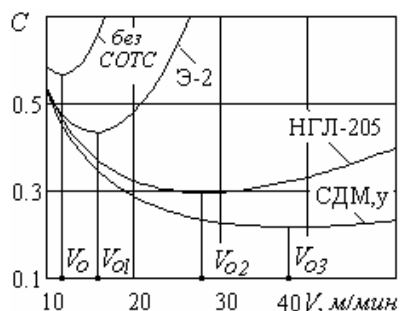


Рис. 3. Залежність себестоимости сверлення від швидкості різання для різних

сверленнях обробкою без СОРС в 1,3 раза.

При використанні емульсолу НГЛ-205 з охолоджуючим і змазуючим ефектом себестоимость обробки знижується в 1,9 раза. Найбільший ефект зниження себестоимости (в 2,6 раза) спостерігається при використанні емульсолу СДМ,у з максимальним змазуючим ефектом.

## Выводы

Розроблена методика оптимізації режимів різання методом геометричного програмування по критерію мінімальної себестоимости при сверленні з використанням змазочно-охолоджуючих технологічних сред. Визначені оптимальні режими сверлення нержавіючої сталі Х18Н9Т.

Установлені аналітичні залежності оптимальних значень подач і швидкостей різання від параметрів процесу сверлення, що дозволяють розраховувати оптимальні режими різання, забезпечуючі мінімальну себестоимость.

На основі експериментальних досліджень встановлено вплив різних змазочно-охолоджуючих технологічних сред на стійкісні залежності при свер-

Графіки залежності оптимальних швидкостей різання  $V_o$  від діаметра сверла при використанні різних СОРС, представлені на рис. 2, дозволяють регламентувати оптимальні швидкості сверлення.

Оптимальні режими різання при заданих умовах обробки (оброблюваний матеріал Х18Н9Т, діаметр сверла з швидкохідної сталі Р18  $D = 8,3 \text{ мм}$ ) - подача  $S_o = 0,15 \text{ мм/об}$ , швидкість різання:

при обробці без застосування СОРС  $V_o = 11,8 \text{ м/мин}$ ,

при обробці з використанням СОРС:  
 $V_{o1(Э-2)} = 15,5 \text{ м/мин}$ ,  $V_{o2(НГЛ-205)} = 26,9 \text{ м/мин}$ ,

Графіки залежності себестоимости сверлення від швидкості різання при використанні різних СОРС представлені на рис. 3.

Із графіка випливає, що мінімальна себестоимость має місце при оптимальних режимах різання.

При обробці без СОРС себестоимость обробки найбільша, а оптимальна швидкість різання має найменшу з усіх порівнюваних варіантів.

Використання в якості СОРС емульсолу Э-2 з переважно охолоджуючим ефектом, дозволяє знизити себестоимость обробки 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. Івченко 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 // Прогресивні технології і системи машинобудування:– Донецьк: ДонНТУ, 2014. Вип. 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 // Прогресивні технології і системи машинобудування:– Донецьк: ДонНТУ, 2010. Вип. 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 technosphere et de la formation des cadres d'ingenieurs // Recueil des exposes 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. Кондрашов 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. Дана кількісна оцінка можливостей зниження собівартості під час свердлення за рахунок використання змащувально-охолоджуючих технологічних середовищ.*

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