

## ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. — Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1987. — 846 с.: ил. 2. Каталог. Новые инструменты от Sandvik Coromant — 2004:2-RUS. 3. Каталог. Hertel 900 - SU. 4. Пат. 563 ВУ. МПК: 7B23B1/00, 27/12. Многолезвийный блочно-модульный режущий инструмент / Попок Н.Н., Терентьев В.А. — № и 20010239; Заявлено 5.10.01; Опубл. 11.12.01/ Афіцыйны бюлетэнь/ Дзярж. пат. в. ведомства Рэсп. Беларусь. — 2002. — №2. — с.32. 5. Бобров, В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. — М.: Машгиз, 1962. — 152 с.

БДК 621.9

*Фельдштейн Е.Э., Маруда Р.*

### **ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭМУЛЬСИОННЫМ ТУМАНОМ НА ИЗМЕНЕНИЯ СИЛ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТОЧЕНИИ СТАЛИ 45**

*Зеленогурский университет  
Зелена Гура, Польша*

Использование смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) при обработке резанием позволяет повысить период стойкости режущего инструмента, улучшить условия стружкообразования и свойства поверхностного слоя, снизить силы резания и т.д. Однако в настоящее время имеет место тенденция сокращения использования СОЖ, что связано как с технологическими, так и с экологическими факторами, в том числе с все более жесткими международными нормами по охране окружающей среды [1, 2]. Использование СОЖ ставит перед производством ряд серьезных проблем и требований [3]. В частности:

- компоненты СОЖ не должны оказывать отрицательного воздействия на здоровье производственного персонала и на окружающую среду;
- в ходе эксплуатации СОЖ не должны образовываться загрязнения на поверхностях станка, в том числе на защитных щитах и обзорных окнах;
- СОЖ в процессе резания должна расходоваться экономно, имея главным образом смазывающее и охлаждающее действия; для этого используются подача СОЖ через каналы в теле инструмента или через специально разработанные сопла;
- в ходе работы оборудования необходим непрерывный контроль СОЖ как с точки зрения ее эксплуатационных свойств, так с точки зрения потерь СОЖ в системе охлаждения.

Последнее обстоятельство может привести к снижению эффективности работы этой системы.

Сокращение объема СОЖ в системе происходит по следующим причинам:

- испарение под действием высоких температур резания;
- разбрызгивание в ходе обработки;
- капли СОЖ после обработки остаются на удаляемых стружке и обрабатываемой детали, а при автоматической загрузке — на схватах автооператоров;
- утечки через уплотнения в системе подачи СОЖ.

Согласно [3], потери СОЖ могут достигать до 30% от ее общего годового расхода, что чревато значительными финансовыми потерями. Согласно данным [1, 2, 4], в автомобильной промышленности Германии стоимость эксплуатации СОЖ (доставка, непосредственно использование, регенерация и утилизация) составляют от 7 до 17% общих производственных

затрат. Следует добавить, что, например, стоимость используемых режущих инструментов равна только 2 – 4%.

Исключить вредное воздействие СОЖ можно в случае резания всухую либо с минимальным расходом технологической среды. В случае, когда „чистого” резания всухую реализовать не удастся, возможной альтернативой является минимализация условий смазывания и охлаждения зоны резания, т.е. ведение в эту зону как можно меньшего количества СОЖ. Расход СОЖ в этом случае составляет менее 50 г/ч [5], т.е. инструмент, деталь и стружка остаются практически сухими. Активные составляющие технологической среды транспортируются в зону резания в струе сжатого воздуха (т.н. масляный или эмульсионный туман). В настоящее время резание всухую и в условиях минимального охлаждения используются все более широко (табл. 1).

Таблица 1. Области применения новых способов охлаждения зоны резания [3]

Способ обработки	Обрабатываемый материал				
	Алюминиевые сплавы		Стали		
	силумины	дюралюмины	высоколегированные	конструкционные, в том числе закаленные	Серые чугуны
Сверление	Т	Т	Т	С/Т	С/Т
Развертывание	Т	Т	Т	Т	Т
Нарезание резьбы	Т	Т	Т	Т	Т
Глубокое сверление	Т	Т	-	Т	Т
Фрезерование	С/Т	Т	С	С	С
Точение	С/Т	С/Т	С	С	С
Зубофрезерование	-	-	С	С	С
Отрезка	Т	Т	Т	Т	Т
Протягивание	-	-	Т	С/Т	С

**Примечание:** Т – охлаждение туманом; С – обработка всухую

Такая обработка не снижает периодов стойкости режущего инструмента [6], поскольку обеспечивает лучшие условия смазывания и охлаждения контактных поверхностей „лезвие – стружка – обрабатываемая деталь”. Присутствие на поверхностях контакта активных составляющих, входящих в состав микрокапель эмульсии, может изменять основные показатели процесса резания, в частности характер стружкообразования, уровень сил резания, условия теплообмена в зоне резания и др.

Исследования проводились при точении стали 45 резцом с твердосплавной пластиной Р25 покрытой нитридом титана. Геометрические параметры резца – передний угол  $-8^\circ$ , задний угол  $8^\circ$ , главный и вспомогательный углы в плане соответственно  $70^\circ$  и  $20^\circ$ , радиус вер-

шины 0,8 мм, радиус округления режущей кроки 0,008 мм. Глубина резания принималась равной 1 мм, диапазон подач 0,1...0,5 мм/об, диапазон скоростей резания 30...350 м/мин.

Обработка проводилась всухую, с охлаждением сжатым воздухом (расход 5,5 м<sup>3</sup>/ч, давление 0,2 МПа) и эмульсионным туманом (расход эмульсии 2,5 г/мин). Использованная эмульсия – OPORDET RG-2 с концентрацией 4%.

На основе измерений толщины стружки можно рассчитать коэффициент ее утолщения, как

$$k_a = \frac{a_c}{\bar{a}}$$

и угол сдвига, как [6]

$$\operatorname{tg}\Phi = \frac{\cos\gamma + 0,05K_a}{0,9K_a - \sin\gamma}, \quad /$$

где  $a_c$  – толщина стружки;  $\bar{a}$  – средняя толщина срезаемого слоя;  $\gamma$  – передний угол.

При точении с небольшими глубинами в резании участвуют одновременно главная и радиусная режущие кромки. В этом случае средняя толщина срезаемого слоя равна [7]:

$$\bar{a} = \frac{S}{1 - \frac{r_B}{t} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{S}{2r_B} \right)^2} \right]} \cdot \sin \operatorname{arctg} \frac{1 - \frac{r_B}{t} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{S}{2r_B} \right)^2} \right]}{\left[ 1 - \frac{r_B}{t} (1 - \cos\varphi) \right] \operatorname{ctg}\varphi + \frac{r_E}{t} \left( \sin\kappa_r + \frac{S}{2r_B} \right)},$$

где  $S$  – подача;  $t$  – глубина резания;  $r_B$  – радиус вершина;  $\varphi$  – главный угол реза в плане.

Эмульсионный туман взаимодействует с нагретыми поверхностями стружки и реза более эффективно по сравнению с СОЖ. С одной стороны, активные вещества, содержащиеся в микрокаплях эмульсии, легче проникают на поверхности контакта, с другой – теплота отводится из зону резания не только вследствие конвективного теплообмена, но и благодаря испарению. В таких условиях наблюдаются существенные изменения в контактных процессах, происходящих в зоне резания.

Нормальную силу  $F_{\gamma N}$  и силу трения  $F_{\gamma}$ , действующие на передней поверхности реза, можно рассчитать, как [7]:

$$F_{\gamma N} = \tau_{пл} St \left( \frac{\cos\gamma - \sin\gamma}{\operatorname{tg}\Phi} + \cos\gamma + \sin\gamma \right),$$

$$F_{\gamma} = \tau_{пл} St \left( \frac{\cos\gamma + \sin\gamma}{\operatorname{tg}\Phi} - \cos\gamma + \sin\gamma \right),$$

где  $\tau_{пл}$  – предел пластичности обрабатываемого материала.

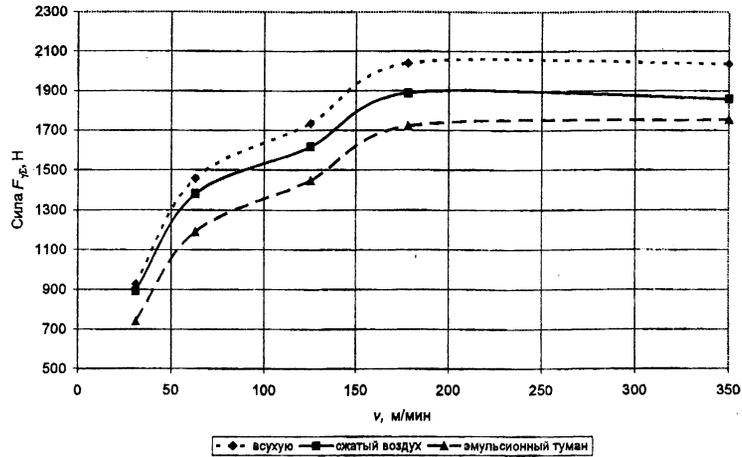
Тогда равнодействующая сила, действующая на передней поверхности реза, равна:

$$F_{\gamma\Sigma} = \sqrt{F_{\gamma}^2 + F_{\gamma N}^2}.$$

На рисунке 1 приведены результаты расчетов силы  $F_{\gamma\Sigma}$  при резании всухую, с охлаждением сжатым воздухом и эмульсионным туманом. Легко заметить, что силы резания снижаются соответственно на 3...15 и 10...20% по сравнению с обработкой всухую. Наиболее эффективно использование эмульсионного тумана при точении с малыми подачами, т.е. при чистовой обработке.

Установленные изменения в уровне сил резания подтверждаются результатами экспериментальных исследований [8].

а)



б)

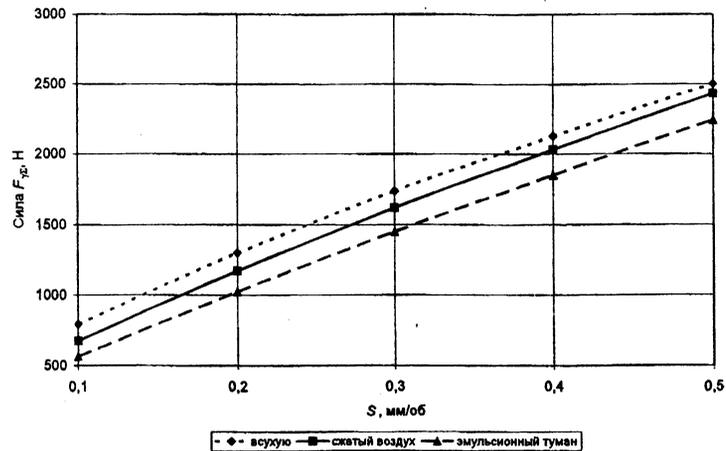


Рисунок 1 - Влияние скорости резания (а) и подачи (б) на уровень силы  $F_{\gamma\Sigma}$

Для расчета тепловых потоков в стружку ( $Q_c$ ), деталь ( $Q_d$ ) и инструмент ( $Q_n$ ) использована система уравнений, основанная на методах теории подобия [7]:

$$Q_c = \frac{\tau_{пл} Stv}{\text{tg}\Phi} \left[ \psi_c n_1 \text{erf} \sqrt{\frac{Pe \text{tg}\Phi}{4}} + n \text{tg}\Phi \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - \text{tg}\Phi (\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + \text{tg}\Phi \sin \gamma} \right],$$

$$Q_d = \tau_c Stv \left( \frac{b}{l_a} \right) \left[ \frac{0.665 n_2 \text{erf} \sqrt{\frac{Pe \text{tg}\Phi}{4}}}{\sqrt{Pe \text{tg}\Phi}} + \frac{0.625 n_3 \left( \frac{\rho}{a_c} \right) \sqrt{(\text{tg}\Phi)^3}}{\sin^{0.55} \alpha} \right],$$

$$Q_n \leq \frac{0.54 \tau_{пл} Stv F^{0.88} \left( \frac{\bar{a}}{b} \right)^{0.26} \left( \frac{b}{l_a} \right)^{0.47} \left( \frac{\rho}{\bar{a}} \right)^{0.27} \text{erf}^{0.35} \sqrt{\frac{Pe \text{tg}\Phi}{4}}}{Pe^{0.615} \sqrt{(1 - \sin \gamma) (\text{tg}\Phi)^{0.72} \sin^{0.15} \alpha}},$$

где  $Pe = \frac{va_c c \rho}{\lambda}$  – критерий Пекле;  $c$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  – объемная теплоемкость, плотность и коэф-

фициент теплопроводности обрабатываемого материала;  $v$  – скорость резания;  $\psi_c$ ,  $n$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  – безразмерные коэффициенты;  $\text{erf}(x)$  – функция ошибок для аргумента  $x$ ;  $\rho$  – радиус округления режущей кромки;  $b$  – ширина срезаемого слоя;  $l_a$  – длина активной части режущей кромки;  $\alpha$  – задний угол.

Безразмерные коэффициенты рассчитываются, как

$$\psi_c = 1 - \frac{2}{\text{Petg}\Phi} + \frac{1.125}{\sqrt{\text{Petg}\Phi}} \frac{\exp\left(-\frac{\text{Petg}\Phi}{4}\right)}{\text{erf}\sqrt{\frac{\text{Petg}\Phi}{4}}},$$

$$n_1 = \frac{1}{1 + \frac{0.225\left(\frac{\lambda_n}{\lambda} \beta \epsilon\right) \left(\frac{\bar{a}}{b}\right)^{0.3}}{\text{Pe}(1 - \sin \gamma)^{0.4}}}, \quad n_2 = \frac{1}{1 + \frac{0.27\left(\frac{\lambda_n}{\lambda} \beta \epsilon\right) \left(\frac{\bar{a}}{b}\right)^{0.3} \left(\frac{\rho}{\bar{a}}\right)^{0.3}}{\sqrt{\text{Pe} \sin^{0.15} \alpha}}},$$

$$n_3 = \frac{1}{1 + \frac{0.35\left(\frac{\lambda_n}{\lambda} \beta \epsilon\right) \left(\frac{\bar{a}}{b}\right)^{0.3} \sin^{0.1} \alpha}{\sqrt{\text{Pe}} \left(\frac{\rho}{\bar{a}}\right)^{0.2}}},$$

где  $\lambda_n$  – коэффициент теплопроводности инструментального материала;  $\beta$ ,  $\epsilon$  – угол заострения и угол при вершине.

Величины  $b$  и  $l_a$  равны

$$b = \frac{St}{\bar{a}}, \quad l_a = \frac{t}{\sin \varphi} \left[ 1 - \frac{r_B}{t} \left( 1 - \cos \varphi - \frac{\varphi}{\sin \varphi} - \frac{\arccos \sqrt{1 - \left(\frac{f}{2r_B}\right)^2}}{\sin \varphi} \right) \right].$$

Общее количество отводимой теплоты равно  $Q_\Sigma = Q_c + Q_d + Q_n$ .

Изменения в уровнях  $Q_\Sigma$  показаны на Рисунок 2. Легко заметить, что при резании с малыми скоростями и подачами тепловые потоки практически не зависят от условий охлаждения. По мере их возрастания теплоотвод улучшается в направлении резание всухую (1,00) → охлаждение сжатым воздухом (0,97...0,89) → охлаждение эмульсионным туманом (0,90...0,86).

Меньшее количество выделяемой теплоты способствует снижению интенсивности изнашивания режущего инструмента и периода его стойкости

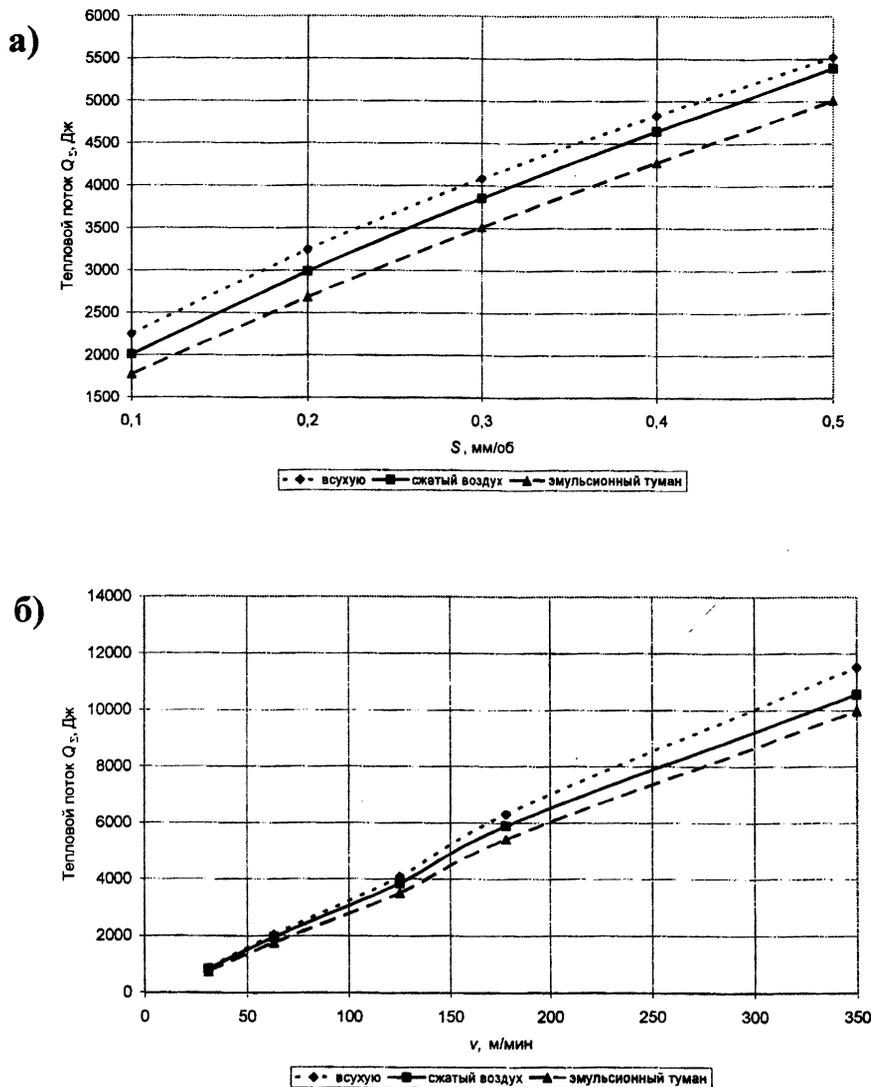


Рис. 2. Влияние скорости резания (а) и подачи (б) на количество отводимой теплоты

## ЛИТЕРАТУРА

- Gente, A., Hoffmeister H.W. Chip Formation in Machining Ti6Al14V at Extremely High Cutting Speeds// Annals of CIRP. – 2001. – Vol. 50. – № 1. – S. 49 – 52.
- Schulz, H. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. High-Speed Machining. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1996. – 286 s.
- Byrne, G., Dornfeld, D., Denkena, B. Advancing Cutting Technology// Annals of CIRP. – 2003. – V.52. – №2. – P. 483 – 509.
- Cselle, T., Barimani A. Today's applications and future developments of coatings for drill and rotating cutting tools// Surface & Coating Technology. – 1995. – Vol. 76 – 77. – S. 712 – 718.
- Schmidt, J., Lang, H., Dyck, M. Trockenbearbeitung ist wirtschaftlich und umweltfreundlich// Maschinenmarkt. – 2001. – № 29. – S.20 – 23.
- Grzesik, W. Podstawy skrawania materiałów metalowych. Warszawa, WNT: 1998.
- Силин, С.С. Метод подобия при резании металлов. М.: Машиностроение, 1979.
- Min, S., Inasaki, I., Fujimura, S., Wada, T., Suda S., Wakabayashi, T. A Study on Tribology in Minimal Quantity Lubrication Cutting // Annals of CIRP. – 2005. – V.54. – №1. – P. 105 – 108.