



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

 Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov


Прогнозирование смазочных свойств СОЖ по их плотности и смачивающему действию

 Антон Кисель^{1, а, *}, Вячеслав Чуранкин^{2, б}
¹ Калининградский государственный технический университет, Советский пр., 1, г. Калининград, 236022, Россия

² Омский государственный технический университет, пр. Мира, 11, г. Омск, 644050, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>, kisel1988@mail.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0002-6031-1340>, churvg@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.895

История статьи:

Поступила: 24 января 2023

Рецензирование: 27 февраля 2023

Принята к печати: 21 марта 2023

Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:

 СОЖ
 Машина трения
 Смазочное действие
 Коэффициент трения
 Эффективность СОЖ
 Плотность
 Краевой угол смачивания
 Эмпирическая зависимость

Благодарности

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Происходящие в зоне резания процессы способствуют быстрому износу режущего инструмента и снижению качества обрабатываемой заготовки. Уменьшения воздействия негативных факторов при обработке металлов резанием можно достичь за счет рационального выбора смазочно-охлаждающей жидкости. **Целью работы** является разработка методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ, применяемых при обработке металлов резанием. **Методы.** Представлены экспериментальные исследования смазочного действия семи различных марок СОЖ при трении колодки из твердого сплава Т15К6 и вращающегося ролика из углеродистой конструкционной стали 45. В качестве параметра эффективности СОЖ по смазочному действию в статье предлагается коэффициент эффективности $K_{см}$, который равен отношению коэффициента трения, возникающего при применении СОЖ, к коэффициенту трения при трении без СОЖ. Чем меньше коэффициент $K_{см}$, тем более эффективна данная СОЖ по смазочному действию. **Результаты.** Были установлены эмпирические зависимости коэффициента $K_{см}$ от плотности СОЖ ρ и краевого угла смачивания Θ ($K_{см} = f(\rho; \Theta)$). Поскольку была установлена низкая значимость параметра ρ , в работе установлена формула зависимости $K_{см}$ только от краевого угла смачивания Θ ($K_{см} = f(\Theta)$). Установлено, что формула зависимости $K_{см} = f(\Theta)$ обеспечивает наибольшую точность расчетов. **Обсуждение.** После оценки результатов исследований, представленных в данной статье, были сделаны следующие выводы: 1) в работе установлены зависимости коэффициента эффективности СОЖ по смазочному действию, определенному для трения между роликом из стали 45 и колодкой из сплава Т15К6, от величины плотности СОЖ и краевого угла смачивания: $K_{см} = f(\rho; \Theta)$ и $K_{см} = f(\Theta)$; 2) наибольшую точность расчетов от 2,75 до 15 % обеспечивает формула зависимости $K_{см} = f(\Theta)$; 3) зависимость $K_{см} = f(\Theta)$ предлагается использовать для методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ при трении колодки из сплава Т15К6 и вращающегося ролика из стали 45. Предложенная методика заключается в проведении измерений краевого угла смачивания капли СОЖ на поверхности заготовки и расчете по выведенной эмпирической зависимости коэффициента эффективности СОЖ по смазочному действию.

Для цитирования: Кисель А.Г., Чуранкин В.Г. Прогнозирование смазочных свойств СОЖ по их плотности и смачивающему действию // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 6–16. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25-2-6-16.

Введение

Обработка металлов резанием сопровождается множеством физических процессов, происходящих в зоне резания: высокой температурой, трением между режущим инструментом, стружкой и заготовкой, внутренним трением, большой силой резания, колебаниями режущего инстру-

мента и заготовки. Указанные процессы способствуют быстрому износу режущего инструмента и снижению качества обрабатываемой заготовки.

Устранение негативных факторов при обработке металлов резанием обеспечивается за счет рационального выбора режимов обработки, режущих инструментов и подачи в зону резания смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Однако рациональному выбору СОЖ на производстве не уделяется должного внимания. При этом известно, что разные СОЖ оказывают на процесс резания различное влияние, поскольку обладают

*Адрес для переписки

 Кисель Антон Геннадьевич, к.т.н., доцент
 Калининградский государственный технический университет,
 Советский пр., 1,
 236022, г. Калининград, Россия
 Тел.: +7 (999) 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

разными свойствами. Для выбора СОЖ, обеспечивающей требуемое качество обрабатываемой заготовки, наибольший период стойкости режущего инструмента и высокую производительность процесса обработки, нужны станочные испытания [1–5]. Однако эти испытания требуют больших затрат времени, затрат на закупку режущих инструментов и СОЖ, из которых надо выбрать наиболее эффективную. В свою очередь, лабораторные испытания являются достаточно экономичными и занимают намного меньше времени, чем станочные. Поэтому для разработки методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ было решено проводить лабораторные испытания взамен станочных.

Несмотря на достоинства лабораторных испытаний, при их проведении нет возможности воспроизвести все условия, возникающие при обработке металлов резанием. При таких испытаниях выполняют моделирование не всего процесса, а лишь некоторых его элементов, оказывающих наибольшее влияние на процесс резания [5–16].

Основываясь на научной литературе о СОЖ, можно сделать вывод, что основными функциональными действиями СОЖ являются смазочное и охлаждающее [17]. Однако моделирование даже одного из видов функциональных действий позволит выбрать СОЖ, которая уменьшит влияние негативных факторов, возникающих при обработке заготовки. Важным является только то, какое из функциональных действий наиболее существенно при заданных условиях обработки.

Одним из наиболее важных функциональных действий СОЖ является смазочное действие. Это обосновывается тем, что уменьшение силы и коэффициента трения при резании обеспечивает снижение интенсивности изнашивания режущего инструмента, увеличение качества обработанной поверхности заготовки и уменьшение температуры в зоне обработки. Поэтому улучшение смазочного действия СОЖ является важной задачей.

Анализ научной литературы, опубликованной в последнее время, показал, что уменьшение влияния трения на процесс резания и сегодня является актуальной задачей. Снижения трения добиваются несколькими способами:

– добавлением в состав СОЖ частиц какого-либо вещества, оказывающего антифрикционное воздействие [1–4, 8, 9, 15–20];

– применением твердых смазочных материалов взамен жидких и противоизносных покрытий на поверхностях режущего инструмента [7, 10–12, 21, 22];

– воздействием на СОЖ различных физических явлений, таких как ультразвук, электрический ток и др. [11, 13, 14];

– применением более эффективных масел в качестве основы СОЖ [2, 20];

– повышением срока службы СОЖ за счет ее стерилизации различными способами, что позволяет дольше сохранять низкий коэффициент трения [23];

– применением в качестве СОЖ ионных жидкостей [8, 14, 24].

Несмотря на большое количество способов уменьшения трения в зоне резания, в настоящее время не решена окончательно проблема выбора наиболее эффективной СОЖ для резания металлургических заготовок. Кроме того, выбор СОЖ является сложным еще и потому, что на рынке представлен достаточно большой ассортимент СОЖ, который постоянно увеличивается.

Настоящая исследовательская работа направлена на разработку методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ. Полученные результаты облегчат выбор эффективной марки СОЖ по смазочному действию. Следовательно, представленные результаты будут полезны для тех условий резания, при которых возникают большие силы трения (например, при черновом резании). Это связано с тем, что при черновой обработке устанавливают большую глубину резания и величину подачи.

Таким образом, **целью данной работы является** разработка методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ, применяемых при обработке металлов резанием. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**: 1) экспериментально оценить смазочное действие СОЖ на машине трения; 2) в лабораторных условиях оценить плотность применяемых СОЖ и их смачивающее действие; 3) установить зависимости показателя смазочного действия СОЖ от их плотности и смачивающего действия одновременно и по отдельности; 4) установить точность расчетов показателя смазочного действия СОЖ по выведенным зависимостям; 5) разработать методику прогнозирования смазочных свойств СОЖ на основе лабораторных испытаний.

Методика исследований

Исследование смазочных свойств СОЖ

В исследованиях смазочного действия СОЖ применялась машина трения модели ИИ5018. Параметром оценки смазочного действия был принят действительный коэффициент трения μ .

Для оценки были взяты СОЖ на водной основе, так как этот тип СОЖ является наиболее распространенным при производстве металлических деталей. Применяемые СОЖ различных составов являлись экспериментальными разработками компании ООО НПО «Промэкология» (г. Омск). Поэтому все СОЖ были пронумерованы и обозначены как СОЖ № 1, СОЖ № 2, СОЖ № 3, СОЖ № 4, СОЖ № 5, СОЖ № 6, СОЖ № 7.

Исследования выполнялись по схеме «колодка – ролик». Колодка изготавливалась из твердого титано-вольфрамо-кобальтового сплава Т15К6, а ролик – из углеродистой конструкционной стали 45.

Принцип действия машины заключается в истирании пары образцов, прижатых друг к другу с силой P .

Применявшаяся схема испытаний «колодка – ролик» позволяет имитировать токарную обработку: роль заготовки играет вращающийся ролик из обрабатываемого материала, а роль инструмента – прижимаемая к ролику колодка из инструментального материала. Исследования проводились при силе давления на колодку $P = 1000$ Н и частоте вращения ролика $n = 250$ об/мин, соответствующих невысоким режимам. Это было сделано целенаправленно, так как при повышении режимов увеличивается сила трения и износ колодки и ролика, а коэффициент трения меняется незначительно.

В качестве параметра эффективности СОЖ по смазочному действию в настоящей статье предлагается коэффициент эффективности $K_{см}$, который равен отношению коэффициента трения, возникающего при применении СОЖ, к коэффициенту трения при трении без СОЖ. Чем меньше значение коэффициента $K_{см}$, тем более эффективна СОЖ по смазочному действию.

Поскольку целью исследований являлась разработка методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ, то на следующем этапе было

решено выбрать параметры СОЖ, которые потенциально могут влиять на смазочное действие СОЖ и не потребуют применения сложного оборудования для их оценки. Одним из таких параметров является плотность (ρ , кг/м³), которую легко оценить в лабораторных условиях. Еще одним из свойств, влияющих на смазочное действие СОЖ, является ее смачивающее действие, которое оценивают по краевому углу смачивания (Θ , град) [17].

Исследование плотности СОЖ

Экспериментальная оценка плотности испытываемых СОЖ производилась с помощью весов AND DL-200 с дискретностью 0,001 г. Внешний вид применявшихся весов представлен на рис. 1.

При испытаниях каждая СОЖ заливалась в мерную емкость. Объем исследуемой СОЖ составлял 120 мл. Емкость с СОЖ устанавливалась на весы и выдерживалась 30 секунд для устранения влияния колебаний. После того как величина массы прекращала колебаться, ее значение записывалось в таблицу. Затем рассчитывались значения плотности каждой марки СОЖ по следующей формуле:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

где m – масса СОЖ, кг; V – объем СОЖ, м³ (который равнялся $120 \cdot 10^{-6}$ м³).



Рис. 1. Внешний вид весов AND DL-200

Fig. 1. Analytical balance AND DL-200

Исследование смачивающих свойств СОЖ

Смачивающие свойства СОЖ оценивают по величине краевого угла смачивания Θ . Измерения краевых углов смачивания проводились с помощью электронного USB-микроскопа. Для этих исследований использовалась заготовка, выполненная из того же сплава, что и ролик, применявшийся при исследованиях смазочных свойств СОЖ. При испытаниях в одной плоскости с поверхностью заготовки устанавливалась ось объектива электронного микроскопа, так как в этом положении можно определить истинное значение краевого угла смачивания. Применявшийся USB-микроскоп представлен на рис. 2.

При испытаниях исследуемая СОЖ с помощью пипетки наносилась на сухую поверхность заготовки. После того как капля СОЖ принимала статическое положение, с помощью микроскопа фиксировалось изображение этой капли.



Рис. 2. Электронный USB-микроскоп

Fig. 2. Digital microscope

По такой методике были получены изображения каплей всех СОЖ. Пример такого изображения представлен на рис. 3.



Рис. 3. Капля СОЖ на поверхности стальной заготовки:

1 – капля СОЖ; 2 – заготовка

Fig. 3. A drop of a coolant on the surface of a steel workpiece:

1 – a coolant drop; 2 – a steel workpiece

Оценка краевого угла смачивания каждой СОЖ на поверхности стальной заготовки производилась в компьютерной программе для черчения КОМПАС v18. При этом проводилась прямая линия, представляющая собой проекцию поверхности заготовки, а также линия, являющаяся проекцией поверхности раздела между каплей СОЖ и окружающим воздухом. В точке пересечения построенных линий строилась касательная к линии поверхности капли СОЖ. Краевым углом смачивания является угол между касательной линией к поверхности капли и проекцией поверхности стальной заготовки. Один из построенных краевых углов смачивания СОЖ представлен на рис. 4.

По описанной методике определялся краевой угол смачивания каждой из испытанных марок СОЖ.

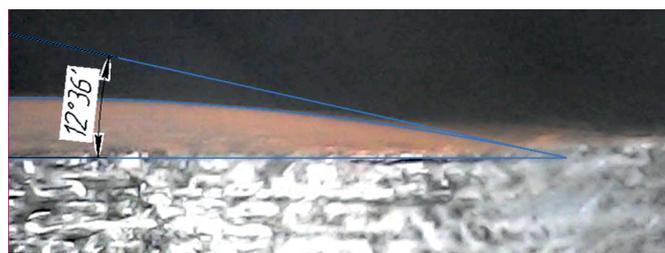


Рис. 4. Измеренное значение краевого угла смачивания СОЖ

Fig. 4. Measured value of the coolant limiting wetting angle

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты оценки смазочного действия СОЖ, их плотности и смачивающего действия представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

Table 1

Показатели смазочного действия СОЖ
Indicators of the coolant lubricating effect

СОЖ	μ	$K_{см}$
Без СОЖ	0,604	–
СОЖ № 1	0,148	0,25
СОЖ № 2	0,117	0,19
СОЖ № 3	0,130	0,22
СОЖ № 4	0,090	0,15
СОЖ № 5	0,082	0,14
СОЖ № 6	0,119	0,20
СОЖ № 7	0,119	0,20

Таблица 2

Table 2

Плотности СОЖ
Coolant densities

СОЖ	ρ , кг/м ³
СОЖ № 1	947,76
СОЖ № 2	926,56
СОЖ № 3	957,60
СОЖ № 4	945,29
СОЖ № 5	953,43
СОЖ № 6	940,36
СОЖ № 7	945,14

Таблица 3

Table 3

Краевые углы смачивания СОЖ
Coolant limiting wetting angles

СОЖ	Θ , град
СОЖ № 1	16,13
СОЖ № 2	12,6
СОЖ № 3	10,02
СОЖ № 4	3,38
СОЖ № 5	6,2
СОЖ № 6	5,72
СОЖ № 7	9,1

В настоящем исследовании предполагается, что коэффициент эффективности СОЖ по смазочному действию $K_{см}$ зависит от плотности СОЖ ρ и краевого угла смачивания Θ . Для того чтобы установить эмпирическую зависимость

этих параметров, в работе применялась компьютерная программа STATISTICA 12. В результате были построены две графические зависимости $K_{см} = f(\rho; \Theta)$, квадратичная и линейная (рис. 5). Параметром *Var1* на рис. 5 обозначен коэффициент $K_{см}$, параметром *Var2* – плотность ρ , кг/м³, а параметром *Var3* – краевой угол смачивания Θ , град.

Кроме того, с помощью программы STATISTICA 12 были установлены математические формулы, описывающие представленные зависимости:

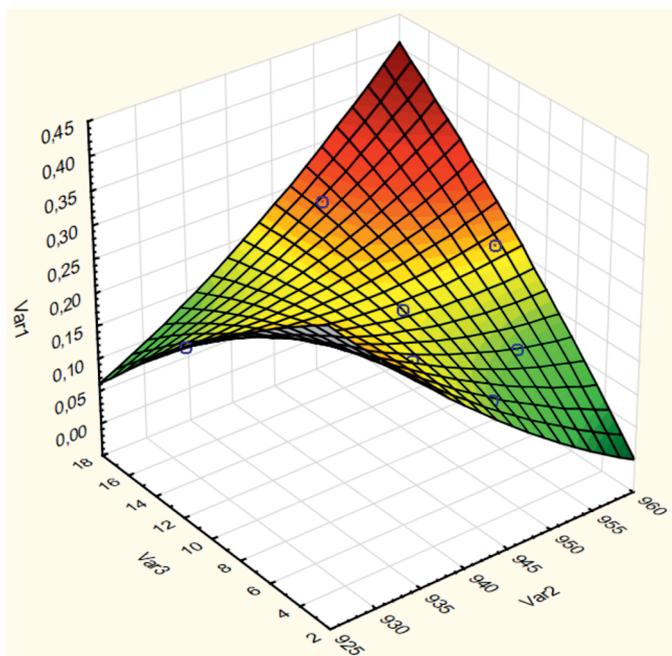
$$K_{см} = 100,9073 - 0,2001\rho - 1,225\Theta + 9,8915 \cdot 10^{-5}\rho^2 + 0,0013\rho\Theta - 0,0003\Theta^2; \quad (2)$$

$$K_{см} = -0,4622 + 0,0006\rho + 0,0071\Theta. \quad (3)$$

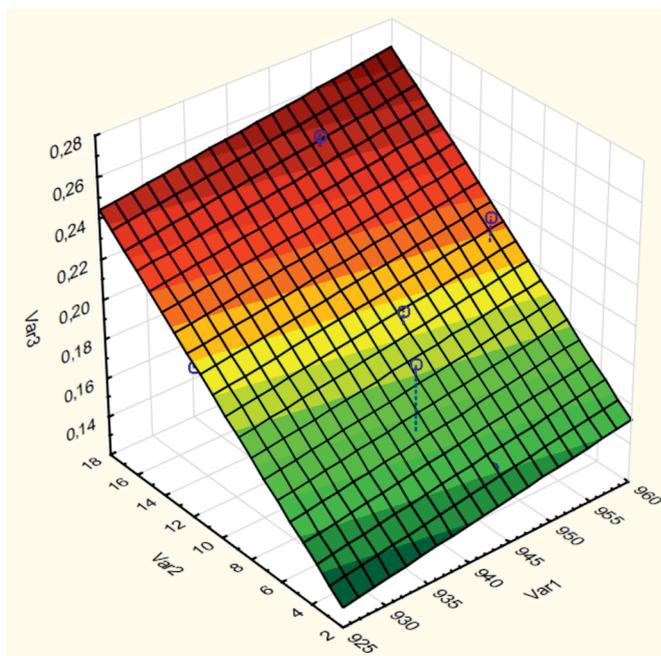
На следующем этапе исследований с целью определения наиболее точной из полученных зависимостей были выполнены расчеты по формулам (2) и (3). Полученные значения сравнивались с экспериментальными значениями $K_{см}$ и определялись величины относительных погрешностей расчетов. В результате было установлено, что погрешность расчетов по формуле (2) по модулю составила от 1,49 до 41,16 %. Погрешность расчетов по формуле (3) по модулю составила от 3,58 до 28,68 %. Таким образом, точность расчетов по формуле (3) в 1,44 раза выше, чем по формуле (2).

Оценка формулы (3) показывает, что постоянный коэффициент при переменной ρ существенно меньше коэффициента при переменной Θ : в 11,83 раза. Это указывает на большую значимость краевого угла смачивания при расчете коэффициента $K_{см}$. Поэтому определение зависимости $K_{см} = f(\rho)$ является нецелесообразным, и следующей целью исследования было установление зависимости $K_{см} = f(\Theta)$. Построенный график представлен на рис. 6.

Графическая зависимость (рис. 6) аппроксимируется прямой линией. Формула, описывающая построенную прямую, также приведена на рис. 6. Путем сравнения значений $K_{см}$ полученных расчетным путем, с экспериментальными значениями $K_{см}$ была установлена относительная погрешность расчетов: от 2,75 до 23,99 %. Следует отметить, что погрешность расчета, равная 23,99 %, была получена только



a



б

Рис. 5. Графические зависимости $K_{CM} = f(\rho; \Theta)$:
a – квадратичная; б – линейная

Fig. 5. Characteristic curves $K_{CM} = f(\rho; \Theta)$:
a – quadratic; б – linear

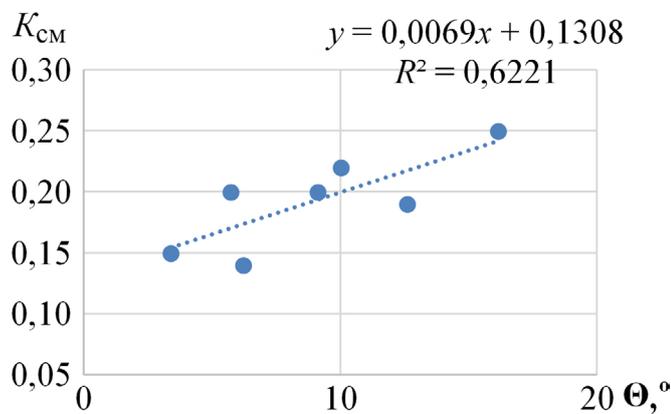


Рис. 6. Графическая зависимость $K_{CM} = f(\rho; \Theta)$
Fig. 6. Characteristic curve $K_{CM} = f(\Theta)$

в одной точке. Погрешность определения K_{CM} в других точках не превышала 15 %. Таким образом, точкой с погрешностью 23,99 % можно пренебречь.

Поскольку было установлено, что погрешность расчета по формуле зависимости $K_{CM} = f(\Theta)$ наименьшая, то для прогнозирования эффективности СОЖ по смазочному действию при трении колодки из сплава Т15К6 и вращающегося

ролика из стали 45 можно использовать следующую зависимость:

$$K_{CM} = 0,0069\Theta + 0,1308. \quad (4)$$

Таким образом, методика ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ, применяемых при обработке металлов резанием, будет заключаться в выполнении исследований по следующему алгоритму:

- 1) на заготовку из требуемого материала с помощью пипетки нанести каплю исследуемой СОЖ;
- 2) после того как капля СОЖ приняла статическое положение, зафиксировать ее изображение с помощью электронного микроскопа;
- 3) с помощью программы для черчения (КОМПАС v18 или другой аналогичной) на полученном изображении провести прямую линию, представляющую собой проекцию поверхности заготовки, а также линию, являющуюся проекцией поверхности раздела между каплей СОЖ и окружающим воздухом;
- 4) в точке пересечения построенных линий провести касательную к поверхности капли СОЖ;

5) измерить угол между касательной линией к поверхности капли и проекцией поверхности заготовки (краевой угол смачивания);

6) рассчитать коэффициент эффективности СОЖ по смазочному действию по формуле (4) (для стальной заготовки);

7) по величине $K_{см}$ оценить эффективность СОЖ. При этом об эффективности СОЖ можно говорить в том случае, если значение $K_{см} < 0$. Чем меньше значение $K_{см}$, тем эффективнее СОЖ по смазочному действию.

Выводы

После оценки результатов исследований, представленных в данной статье, были сделаны следующие выводы.

В работе установлены зависимости коэффициента эффективности СОЖ по смазочному действию, определенному для трения между роликом из стали 45 и колодкой из сплава Т15К6, от величины плотности СОЖ и краевого угла смачивания: $K_{см} = f(\rho; \Theta)$, $K_{см} = f(\rho)$ и $K_{см} = f(\Theta)$.

Наибольшую точность расчетов от 2,75 до 15 % обеспечивает формула зависимости $K_{см} = f(\Theta)$:

$$K_{см} = 0,0069\Theta + 0,1308.$$

Зависимость $K_{см} = f(\Theta)$ предлагается использовать для методики ускоренной оценки смазочных свойств СОЖ при трении колодки из сплава Т15К6 и вращающегося ролика из стали 45.

Предложенная методика заключается в проведении измерений краевого угла смачивания капли СОЖ на поверхности заготовки и расчете по выведенной эмпирической зависимости коэффициента эффективности СОЖ по смазочному действию.

Смазочное действие является одним из основных, но не единственным функциональным действием СОЖ. Поэтому при различных режимах обработки степень влияния этого действия на процесс резания будет разной. Применение СОЖ, выбранной по предложенной методике, окажет положительное влияние, но наибольшим эффектом окажется тогда, когда главенствующим будет смазочное действие. Например, при невысоких режимах резания, когда в зоне обработки не возникает высоких температур и смазочное действие выходит на первый план.

Список литературы

1. Quantitative analysis of cooling and lubricating effects of graphene oxide nanofluids in machining titanium alloy Ti6Al4V / G. Li, S. Yi, N. Li, W. Pan, C. Wen, S. Ding // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – Vol. 271. – P. 584–598. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.035.
2. Joseph Babu K., Prabhakaran Nair K., Joy M.L. Development of cutting fluid from transesterified coconut oil and evaluation of its tribological properties // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. – 2019. – Vol. 233 (3). – P. 369–379. – DOI: 10.1177/1350650118785467.
3. Synergism of TiO₂ and graphene as nano-additives in bio-based cutting fluid – An experimental investigation / R. Anand, A. Raina, M. Irfan Ul Haq, M.J. Mir, O. Gulzar, M.F. Wani // *Tribology Transactions*. – 2021. – Vol. 64 (2). – P. 350–366. – DOI: 10.1080/10402004.2020.1842953.
4. Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel / O. Öndin, T. Kivak, M. Sarıkaya, Ç.V. Yıldırım // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 148. – P. 106323. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106323.
5. Investigation of the role of tribolayer formation in improving drilling performance of Ti-6Al-4V using minimum quantity of lubrication / S. Bhowmick, B. Eskandari, M.Z.U. Khan, A.T. Alpas // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. – 2021. – Vol. 235 (2). – P. 396–409. – DOI: 10.1177/1350650120933420.
6. Synthesis and tribological characteristics of a nano CuO particle-filled water-based lubricants / T. Rajmohan, D. Hemanth Kumar, R. Nivithetha, Elamburthi, V.V. Kalyan Chakravarthy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 954. – P. 012045. – DOI: 10.1088/1757-899X/954/1/012045.
7. Kumar Rakesh G., Suresh Kumar Reddy N. Tribological studies of EN31 steel and Ti-6Al-4V alloy materials using pin-on-disc tribometer // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 28 (2). – P. 1216–1220. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.509.
8. Ionic liquids as additives to cutting fluids to reduce machine tool friction and wear / C. Ferri, M. Troise, S. Lizarazo, P. Iglesias // *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Proceedings (IMECE)*. – 2018. – Vol. 12. – P. V012T11A046. – DOI: 10.1115/IMECE2018-86810.
9. Experimental investigations to enhance the tribological performance of engine oil by using nano-boric acid and functionalized multiwalled carbon nanotubes: A comparative study to assess wear in bronze



alloy / B.S. Ajay Vardhaman, M. Amarnath, J. Ramkumar, P.K. Rai // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2018. – Vol. 27 (6). – P. 2782–2795. – DOI: 10.1007/s11665-018-3384-9.

10. The tribological properties of titanium carbonitride TiCN coating lubricated with non-toxic cutting fluid / M. Madej, J. Kowalczyk, D. Ozimina, K. Milewski // *Materials Research Proceedings*. – 2018. – Vol. 5. – P. 47–53. – DOI: 10.21741/9781945291814-9.

11. Wu Z., Li S., Zhou F. Electrochemical and tribological properties of TiSiCN coatings in coolant // *Materials Science-Medziagotyra*. – 2019. – Vol. 25 (2), pp. 159–165. – DOI: 10.5755/j01.ms.25.2.19252.

12. Electrochemical and tribological properties of CrAlN, TiAlN, and CrTiN coatings in water-based cutting fluid / Z. Wu, Z. Cheng, H. Zhang, Z. Xu, Y. Wang, F. Zhou // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2020. – Vol. 29 (4), pp. 2153–2163. – DOI: 10.1007/s11665-020-04772-3.

13. Development of a tribotester for investigation of ferrofluids lubrication performance on the thrust pad bearing / M. Chhattal, L. Tonggang, Y. Kun, L.Ü. Xin, L. Guangsheng // *Tribology Transactions*. – 2020. – Vol. 63 (6). – P. 1095–1102. – DOI: 10.1080/10402004.2020.1794092.

14. Investigation of the tribological performance of ionic liquids in non-conformal EHL contacts under electric field activation / M. Michalec, P. Svoboda, I. Krupka, M. Hartl, A. Vencl // *Friction*. – 2020. – Vol. 8 (5). – P. 982–994. – DOI: 10.1007/s40544-019-0342-y.

15. Preliminary investigations on the tribological performance of hexagonal boron nitride nanofluids as lubricant for steel/steel friction pairs / J. He, J. Sun, Y. Meng, X. Yan // *Surface Topography: Metrology and Properties*. – 2019. – Vol. 7 (1). – P. 015022. – DOI: 10.1088/2051-672X/ab0afb.

16. Zhao C., Chen Y.K., Ren G. A study of tribological properties of water-based ceria nanofluids // *Tribology and Lubrication Technology*. – 2017. – Vol. 73 (3). – P. 56–66.

17. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids / Z. Said, M. Gupta, H. Hegab, N. Arora, A.M. Khan, M. Jamil, E. Bellos // *International Journal*

of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 105 (5–6). – P. 2057–2086. – DOI: 10.1007/s00170-019-04382-x.

18. Investigation on the effects of nanoparticles on cutting fluid properties and tribological characteristics / N. Madanchi, S. Zellmer, M. Winter, F. Flach, G. Garnweitner, C. Herrmann // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*. – 2019. – Vol. 6 (3). – P. 433–447. – DOI: 10.1007/s40684-019-00053-0.

19. Cetin M.H., Korkmaz S. Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 147. – P. 106273. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106273.

20. Tribological investigation of r-GO additived biodegradable cashew nut shells liquid as an alternative industry lubricant / S. Bhaumik, V. Paleu, R. Pathak, R. Maggirwar, J.K. Katiyar, A.K. Sharma // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 135. – P. 500–509. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.007.

21. Influence of C content on the structure, mechanical and tribological properties of CrAlCN films in air and water-based cutting fluid / M. Zhang, F. Zhou, H. Fang, Z. Wu // *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. – 2020. – Vol. 126 (8). – DOI: 10.1007/s00339-020-03782-1.

22. Ozimina D., Madej M., Kowalczyk J. Determining the tribological properties of diamond-like carbon coatings lubricated with biodegradable cutting fluids // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2017. – Vol. 62 (4). – P. 2065–2072. – DOI: 10.1515/amm-2017-0306.

23. Tribological properties of cutting fluid sterilized by atmospheric-pressure plasma treatment / J. Miyamoto, M. Kodama, S. Kawada, R. Tsuboi // *Tribology Online*. – 2018. – Vol. 13 (5). – P. 248–253. – DOI: 10.2474/trol.13.248.

24. Panneer R., Panneerselvam T. Experimental investigation on the effect of ionic liquids (C₁₆H₃₆BrP and C₁₆H₃₆BrN) on the tribological performance of neem oil // *International Journal of Surface Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 14 (1). – P. 16–33. – DOI: 10.1504/ijsurfse.2020.105877.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Predicting the coolant lubricating properties based on its density and wetting effect

Anton Kisel'^{1, a, *}, Vyacheslav Churankin^{2, b}

¹ Kaliningrad State Technical University, 1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad, 236022, Russian Federation

² Omsk State Technical University, 11 Prospekt Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>,  kisel1988@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-6031-1340>,  churvg@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 January 2023

Revised: 27 February 2023

Accepted: 21 March 2023

Available online: 15 June 2023

Keywords:

Coolant

Friction machine

Lubricating action

Coefficient of friction

Coolant efficiency

Density

Limiting wetting angle

Empirical dependence

Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. The processes occurring in the cutting zone contribute to the rapid wear of the cutting tool and a decrease in the quality of the workpiece. It is possible to reduce the impact of negative factors during metal cutting through a rational choice of coolant. The **aim of the work** is to develop a methodology for the accelerated assessment of the coolant lubricating properties. **Methods.** This paper presents experimental studies of the lubricating effect of seven different grades of coolant, during friction of a T15K6 (15 % TiC–79% WC–6 % Co) hard alloy pad and a rotating roller made of carbon structural Steel 45 (0.45 % C) are presented. As a parameter of coolant efficiency in terms of lubricating effect, this paper proposes an efficiency coefficient K_c , which is equal to the ratio between the friction coefficient that occurs when using coolant and the friction coefficient during friction without coolant. The lower the coefficient K_c , the more effective this coolant is in terms of lubricating effect. **Results.** Empirical dependences of the coefficient K_c on the coolant density ρ and the limiting wetting angle Θ ($K_c = f(\rho; \Theta)$) are established. Since the low significance of the parameter ρ is established, the formula for the dependence of the K_c only on the limiting wetting angle Θ ($K_c = f(\Theta)$) is established in the work. It is established that the dependence formula ($K_c = f(\Theta)$) provides the highest accuracy of calculations. **Discussion.** After evaluating the research results presented in this paper, the following conclusions are made: 1) the paper establishes the influence of the coolant density and the limiting wetting angle on the coolant efficiency coefficient for the lubricating effect determined for the friction between a roller made of Steel 45 and a pad made of T15K6 alloy: $K_c = f(\rho; \Theta)$ and $K_c = f(\Theta)$; 2) the greatest accuracy of calculations from 2.75 to 15 % is provided by the formula for the dependence $K_c = f(\Theta)$; 3) the dependence $K_c = f(\Theta)$ is proposed to be used for the method for the accelerated assessment of the coolant lubricating properties during friction of a pad made of T15K6 alloy and a rotating roller made of Steel 45. The proposed method consists in measuring the limiting wetting angle of a coolant drop on the surface of the workpiece and calculating the derived empirical dependence of the coolant efficiency coefficient on the lubricating effect.

For citation: Kisel' A.G., Churankin V.G. Predicting the coolant lubricating properties based on its density and wetting effect. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 6–16. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-6-16. (In Russian).

References

- Li G., Yi S., Li N., Pan W., Wen C., Ding S. Quantitative analysis of cooling and lubricating effects of graphene oxide nanofluids in machining titanium alloy Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 271, pp. 584–598. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.035.
- Joseph Babu K., Prabhakaran Nair K., Joy M.L. Development of cutting fluid from transesterified coconut oil and evaluation of its tribological properties. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2019, vol. 233 (3), pp. 369–379. DOI: 10.1177/1350650118785467.

* Corresponding author

Kisel' Anton G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Kaliningrad State Technical University,
 1 Sovetsky Prospekt,
 236022, Kaliningrad, Russian Federation
 Tel.: +7 (999) 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

3. Anand R., Raina A., Irfan Ul Haq M., Mir M.J., Gulzar O., Wani M.F. Synergism of TiO₂ and graphene as nano-additives in bio-based cutting fluid – An experimental investigation. *Tribology Transactions*, 2021, vol. 64 (2), pp. 350–366. DOI: 10.1080/10402004.2020.1842953.
4. Öndin O., Kıvık T., Sarıkaya M., Yıldırım Ç.V. Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel. *Tribology International*, 2020, vol. 148, p. 106323. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106323.
5. Bhowmick S., Eskandari B., Khan M.Z.U., Alpas A.T. Investigation of the role of tribolayer formation in improving drilling performance of Ti-6Al-4V using minimum quantity of lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2021, vol. 235 (2), pp. 396–409. DOI: 10.1177/1350650120933420.
6. Rajmohan T., Hemanth Kumar D., Nivithetha R., Elamburthi, Kalyan Chakravarthy V.V. Synthesis and tribological characteristics of a nano CuO particle-filled water-based lubricants. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 954, p. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/954/1/012045.
7. Kumar Rakesh G., Suresh Kumar Reddy N. Tribological studies of EN31 steel and Ti-6Al-4V alloy materials using pin-on-disc tribometer. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 28 (2), pp. 1216–1220. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.509.
8. Ferri C., Troise M., Lizarazo S., Iglesias P. Ionic liquids as additives to cutting fluids to reduce machine tool friction and wear. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Proceedings (IMECE)*, 2018, vol. 12, p. V012T11A046. DOI: 10.1115/IMECE2018-86810.
9. Ajay Vardhaman B.S., Amarnath M., Ramkumar J., Rai P.K. Experimental investigations to enhance the tribological performance of engine oil by using nano-boric acid and functionalized multiwalled carbon nanotubes: A comparative study to assess wear in bronze alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, vol. 27 (6), pp. 2782–2795. DOI: 10.1007/s11665-018-3384-9.
10. Madej M., Kowalczyk J., Ozimina D., Milewski K. The tribological properties of titanium carbonitride TiCN coating lubricated with non-toxic cutting fluid. *Materials Research Proceedings*, vol. 5, pp. 47–53. DOI: 10.21741/9781945291814-9.
11. Wu Z., Li S., Zhou F. Electrochemical and tribological properties of TiSiCN coatings in coolant. *Materials Science-Medziagotyra*, 2019, vol. 25 (2), pp. 159–165. DOI: 10.5755/j01.ms.25.2.19252.
12. Wu Z., Cheng Z., Zhang H., Xu Z., Wang Y., Zhou F. Electrochemical and tribological properties of CrAlN, TiAlN, and CrTiN coatings in water-based cutting fluid. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, vol. 29 (4), pp. 2153–2163. DOI: 10.1007/s11665-020-04772-3.
13. Chhattal M., Tonggang L., Kun Y., Xin L.Ü., Guangsheng L. Development of a tribotester for investigation of ferrofluids lubrication performance on the thrust pad bearing. *Tribology Transactions*, 2020, vol. 63 (6), pp. 1095–1102. DOI: 10.1080/10402004.2020.1794092.
14. Michalec M., Svoboda P., Krupka I., Hartl M., Vencel A. Investigation of the tribological performance of ionic liquids in non-conformal EHL contacts under electric field activation. *Friction*, 2020, vol. 8 (5), pp. 982–994. DOI: 10.1007/s40544-019-0342-y.
15. He J., Sun J., Meng Y., Yan X. Preliminary investigations on the tribological performance of hexagonal boron nitride nanofluids as lubricant for steel/steel friction pairs. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2019, vol. 7 (1), p. 015022. DOI: 10.1088/2051-672X/ab0afb.
16. Zhao C., Chen Y.K., Ren G. A study of tribological properties of water-based ceria nanofluids. *Tribology and Lubrication Technology*, 2017, vol. 73 (3), pp. 56–66.
17. Said Z., Gupta M., Hegab H., Arora N., Khan A.M., Jamil M., Bellos E. A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 105 (5–6), pp. 2057–2086. DOI: 10.1007/s00170-019-04382-x.
18. Madanchi N., Zellmer S., Winter M., Flach F., Garnweitner G., Herrmann C. Investigation on the effects of nanoparticles on cutting fluid properties and tribological characteristics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 2019, vol. 6 (3), pp. 433–447. DOI: 10.1007/s40684-019-00053-0.
19. Cetin M.H., Korkmaz S. Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method. *Tribology International*, 2020, vol. 147, p. 106273. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106273.
20. Bhaumik S., Paleu V., Pathak R., Maggirwar R., Katiyar J.K., Sharma A.K. Tribological investigation of r-GO additived biodegradable cashew nut shells liquid as an alternative industry lubricant. *Tribology International*, 2019, vol. 135, pp. 500–509. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.007.

21. Zhang M., Zhou F., Fang H., Wu Z. Influence of C content on the structure, mechanical and tribological properties of CrAlCN films in air and water-based cutting fluid. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2020, vol. 126 (8). DOI: 10.1007/s00339-020-03782-1.

22. Ozimina D., Madej M., Kowalczyk J. Determining the tribological properties of diamond-like carbon coatings lubricated with biodegradable cutting fluids. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, vol. 62 (4), pp. 2065–2072. DOI: 10.1515/amm-2017-0306.

23. Miyamoto J., Kodama M., Kawada S., Tsuboi R. Tribological properties of cutting fluid sterilized by atmospheric-pressure plasma treatment. *Tribology Online*, 2018, vol. 13 (5), pp. 248–253. DOI: 10.2474/trol.13.248.

24. Panneer R., Panneerselvam T. Experimental investigation on the effect of ionic liquids ($C_{16}H_{36}BrP$ and $C_{16}H_{36}BrN$) on the tribological performance of neem oil. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2020, vol. 14 (1), pp. 16–33. DOI: 10.1504/ijsurfse.2020.105877.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).