

Abstract

This paper studies the influence of the type of friction (sliding/rolling) on the behavior of anti-wear additives in lithium grease. The grease was tested for wear under sliding friction conditions (four-ball friction machine) and as part of a rolling bearing. To assess the wear of a rolling bearing, a technique has been developed that allows for a high-precision assessment of ring wear.

The article provides an analysis of the test results of prototype lubricants and the effect of the lubricant on a rolling bearing.

Keywords: plastic lubricants, anti-wear additives, lubricating properties, rolling friction, sliding friction, nanodiamonds.

УДК 621.892

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-233

А. В. Шолом

Хозрасчётный творческий центр уфимского авиационного института,
г. Уфа, Россия. rosoil@rosoil.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ОХЛАЖДАЮЩИМИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Аннотация.

В работе приведены результаты исследований, целью которых являлось определение влияния охлаждающих свойств масляных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), применяемые в различных процессах металлообработки, на их триботехнические характеристики. Приведена конструкция и краткое описание установки УЗС-2, которая позволяет оценивать охлаждающие характеристики СОЖ и получать зависимости «температура-время», «температура-скорость» на металлической поверхности. Установлены экспериментальные зависимости триботехнических свойств испытуемых масляных СОЖ от их охлаждающих характеристик. Показано, что с увеличением температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения СОЖ, повышаются противозадирные и противоизносные свойства СОЖ, определенные по ГОСТ 9490 на четырехшариковой машине трения.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость, охлаждающие характеристики, максимальная скорость охлаждения, триботехнические свойства, нагрузка сваривания.

Введение

Улучшение отвода тепла из зоны резания при применении СОЖ способствует снижению температуры на контакте «инструмент – деталь», что в свою очередь уменьшает интенсивность изнашивания инструмента и повышает его стойкость. В тоже время снижение температуры в зоне обработки позволяет повысить скоростные режимы обработки, точность получаемых размеров заготовки за счет уменьшения температурных деформаций и оказывает влияние на остаточные напряжения в поверхностном слое [1].

В настоящее время исследователями и разработчиками СОЖ для процессов

металлообработки, при испытаниях и определении эффективности СОЖ в лабораторных условиях, недостаточное внимание уделяется их охлаждающим свойствам [2-5].

В исследованиях профессора А. Д. Макарова показано, что для каждой пары «инструмент-заготовка» существует своя оптимальная температура резания, при которой обеспечивается минимальный износ инструмента, минимальная шероховатость и наклеп на поверхности заготовки. Из этого положения вытекает, что для поддержания оптимальной температуры резания и минимального износа инструмента применение СОЖ с высокими охлаждающими свойствами позволит осуществлять процесс резания при больших скоростях обработки [6].

Триботехнические свойства СОЖ, в отличие от их охлаждающих характеристик, довольно хорошо определяются стандартными методами испытаний, например, по ГОСТ 9490 на четырехшариковой машине трения. А оценку охлаждающих свойств СОЖ по стандартным характеристикам, такими как теплоемкость, теплопроводность или теплоотдача, нельзя считать корректной, в связи с тем, что в температурном интервале технологического процесса жидкость, как правило, претерпевает фазовый переход в газообразное состояние.

Трудность разработки и выбора СОЖ объясняется не только отсутствием общепризнанной теории, объясняющей многочисленные аспекты механизма действия СОЖ, но и отсутствием оборудования и методов для определения охлаждающих характеристик СОЖ на стадии лабораторных исследований.

С учетом вышеизложенного, исследование влияния охлаждающих свойств СОЖ на их триботехнические характеристики, а также создание методов и оборудования для инструментального контроля охлаждающих характеристик СОЖ является актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

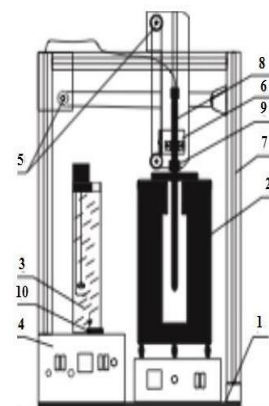
В лабораториях «ХТЦ УАИ» для определения охлаждающих характеристик технологических жидкостей создана специальная установка [7,8]. Отличие созданной установки УЗС-2 от известных заключается, прежде всего, в возможности проводить испытания в соответствии с требованиями международных стандартов ISO 9950, ASTM D6200 – 01 и ASTM D6482 – 06 [9-11]. Кроме этого, наличие механизма автоматического переноса термодатчика в ёмкость с исследуемой жидкостью повышает точность получаемых данных и безопасность для обслуживающего персонала в отличие от зарубежных аналогов. На рисунке 1 показаны внешний вид установки (а) и ее схема (б).

Цилиндрический образец из никелевого сплава Х20Н80, имеющий термопару в своём геометрическом центре, нагревается в печи до температуры 850 ± 5 °С и затем переносится в фиксированный объем тестируемой среды. Компьютерная программа регистрирует, обрабатывает параметры охлаждения термодатчика и выводит на дисплей монитора следующую информацию: графики «температура – время охлаждения», «температура – скорость охлаждения», значения времени охлаждения от температуры 850 °С до температур 600 °С, 400 °С и 200 °С, максимальную скорость охлаждения, температуру при максимальной скорости охлаждения, скорость охлаждения при 300 °С.

Исследование с помощью данной установки охлаждающего действия различных СОЖ, позволяет осуществить выбор СОЖ с наиболее приемлемой охлаждающей способностью в определенном температурном диапазоне [12-15].



а)



б)

Рисунок 1- Внешний вид установки (а) для определения охлаждающих характеристик технологических и закалочных жидкостей и схема установки с механизмом переноса термодатчика (б): 1 – основание; 2 - печь; 3 - ёмкость с подогревом и перемешивающим устройством; 4 - блок управления; 5 - шаговые двигатели; 6 - держатель термодатчика; 7 - П-образная вертикальная стойка; 8 - термодатчик; 9 - втулка-заглушка; 10 – направляющие.

Для исследования триботехнических характеристик в данной работе использовали четырехшариковую машину трения, так как работы Берлинера Э.М., Буяновского И.А. и Шашина А.М. показали, что для определения трибологических характеристик СОЖ, применяемых при резании металлов и сплавов, целесообразно использовать машины трения скольжения с точечным контактом, позволяющим развивать более высокие давления, чем при линейном контакте. Опубликованные этими авторами результаты модельных и станочных испытаний множества составов водных и масляных СОЖ показали, что наиболее информативным показателем с точки зрения стойкости инструмента, является не коэффициент трения, а нагрузка сваривания P_s , которая определяет предельную работоспособность смазочного материала и может определяться по ГОСТ 9490-75 на четырехшариковой машине трения.

Таким образом, в данной работе для исследования взаимосвязи между охлаждающими и триботехническими характеристиками смазочно-охлаждающих жидкостей, охлаждающие свойства СОЖ определяли на установке УЗС-2 по ISO 9950, ASTM D6200 - 01 и ASTM D6482 – 06, а их триботехнические характеристики (нагрузку сваривания и диаметр пятна износа) по ГОСТ 9490-75.

Результаты исследований и их обсуждение

Для исследования охлаждающих характеристик наиболее распространенных минеральных масел, которые используются в качестве СОЖ на легких и средненагруженных операциях в процессах металлообработки, были выбраны следующие:

- масла индустриальные И-5А, И-12А, И-20А, И-40А по ГОСТ 20799-88;
- масло компрессорное КС-19 по ГОСТ 9243-75;

В таблице 1 приведены средние значения охлаждающих характеристик исследуемых масел, которые получены из 5 опытов.

Из полученных экспериментальных данных установлено, что с увеличением кинематической вязкости исследуемых минеральных масел, – увеличивается температура, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения инструмента и заготовки, а также уменьшаются время охлаждения до 600 °С и

скорость охлаждения при 300 °С.

Таблица 1- Плотность, вязкость и охлаждающие характеристики испытываемых масляных СОЖ

Тестируемая СОЖ	Плотность при 20 °С, кг/м ³	Кинематическая вязкость (ν) при 40 °С, сСт	Время охлаждения до 600°С, сек	Скорость охлаждения при 300°С, °С/сек	Максимальная скорость, °С/сек	Температура при максимальной скорости, °С
И-5А	870	7	6,73	6,16	68,09	541,67
И-12А	880	14	6,32	5,92	71,73	567,54
И-20А	890	30	6,18	5,83	67,40	592,33
И-40А	900	65	5,35	5,77	78,42	616,80
КС-19	905	225	4,94	5,00	77,82	691,54

При этом выявлено, что изменение кинематической вязкости масел не оказывает влияния на величину максимальной скорости охлаждения.

Установлено, что максимальные скорости охлаждения всех масел различаются друг от друга незначительно. Но их температуры при максимальной скорости охлаждения существенно различаются, и прослеживается определенная зависимость от кинематической вязкости масел.

На рис. 2 показана зависимость температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения от кинематической вязкости масел.

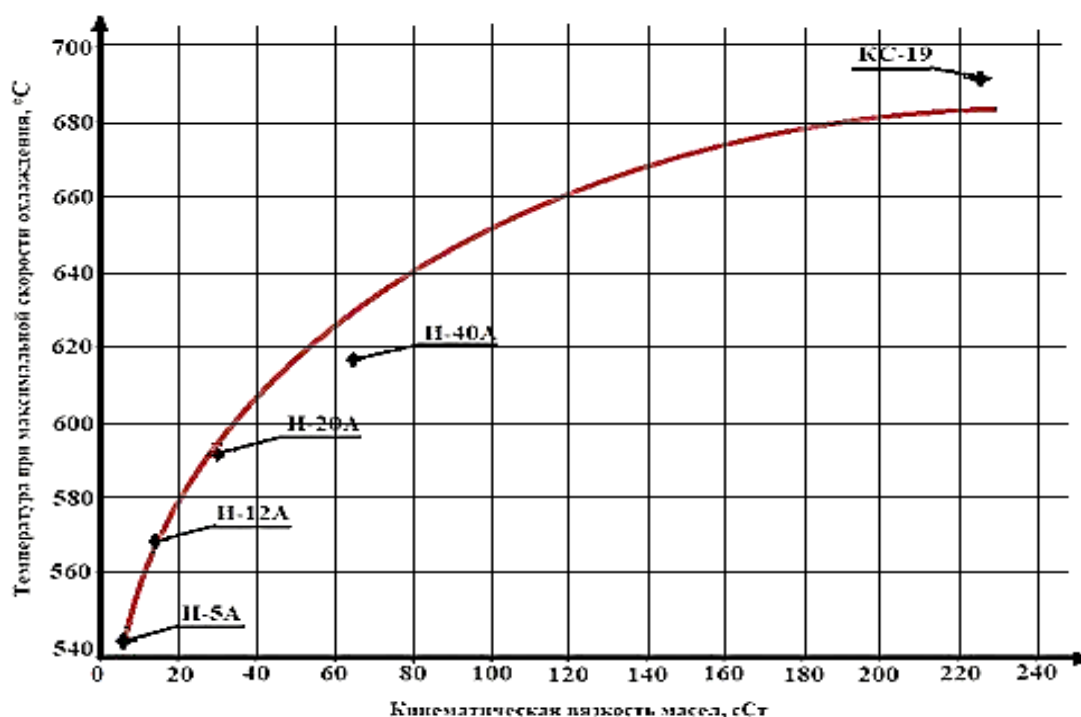


Рисунок 2 – Зависимость температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения, от кинематической вязкости масел при температуре 40 °С.

Полученную зависимость на рисунке 2 можно описать формулой:

$$T_{\text{мсо}} = 471,64 \nu^{0,07} \quad (1)$$

где $T_{\text{мсо}}$ – температура, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения; ν – кинематическая вязкость испытываемых масел при температуре 40 °С.

В таблице 2 приведены триботехнические характеристик исследуемых минеральных масел, кинематическая вязкость и температура, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения.

Таблица 2 – Вязкостные, охлаждающие и триботехнические характеристики испытуемых масляных СОЖ

СОЖ	Кинематическая вязкость (ν) при 40 °С, сСт	Температура, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения, °С	Нагрузка сваривания (P_c), Н	Диаметр пятна износа $D_{и}$, мм (392 Н, 1 час)
И-5А	7	542	1166	1,48
И-12А	14	568	1303	1,40
И-20А	30	592	1470	0,90
И-40А	65	617	1470	0,89
КС-19	225	692	1646	0,73

В результате проведенных исследований на ЧМТ-1 масляных СОЖ установлено, что с увеличением кинематической вязкости исследуемых минеральных масел, повышаются их триботехнические характеристики, а именно: возрастает нагрузка сваривания и уменьшается пятно износа.

По данным, приведенным в таблице 2, построены зависимости нагрузки сваривания (линия 1) и диаметра пятна износа (линия 2) от температуры, при максимальной скорости охлаждения для масляных СОЖ. Они представлены на рисунке 3.

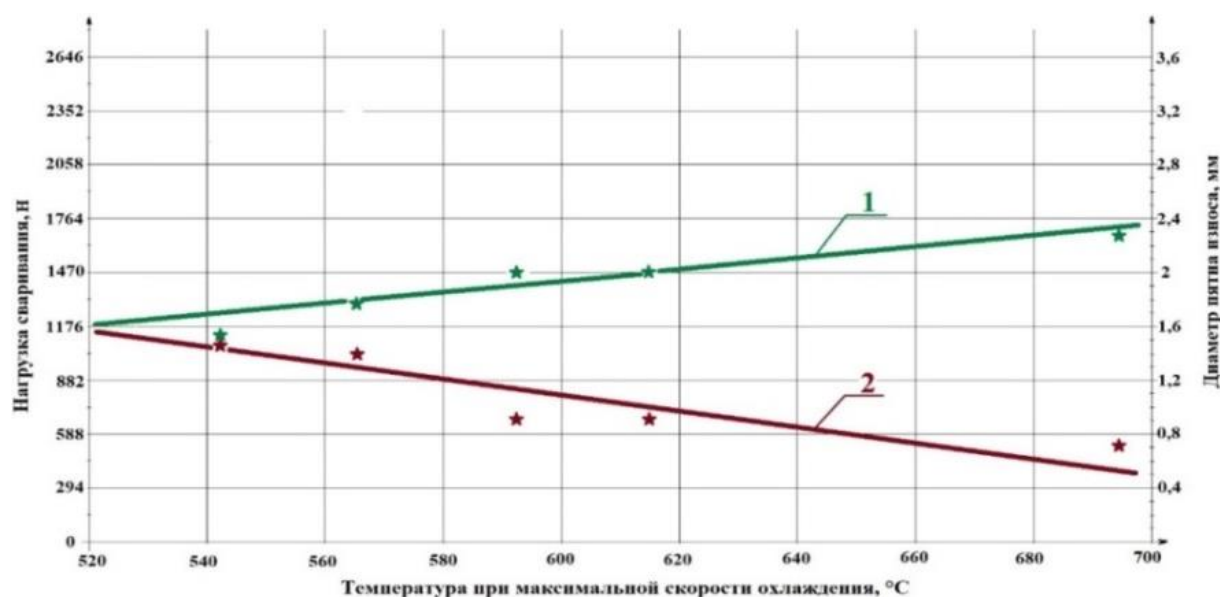


Рисунок. 3 - Зависимость нагрузки сваривания и диаметра пятна износа от температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения.

Зависимость нагрузки сваривания от температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения для масляных СОЖ (линия 1), показанную на рис. 4 можно описать формулой:

$$P_c = 0,31 \times T_{\text{мсо}} - 42,08 \quad (2)$$

где P_c – нагрузка сваривания;

$T_{\text{мсо}}$ – температура при максимальной скорости охлаждения.

Зависимость диаметра пятна износа от температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения для масляных СОЖ (линия 2),

описывается формулой:

$$D_{и} = - 0,01 T_{мсо} + 4,51 \quad (3)$$

где $D_{и}$ – диаметр пятна износа,

$T_{мсо}$ – температура, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения.

Из рисунка 3 следует, что для масляных СОЖ с повышением температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения, растет нагрузка сваривания и уменьшается диаметр пятна износа, т.е. повышаются противозадирные и противоизносные свойства, определяемые по ГОСТ 9490.

Далее были проведены исследования по определению охлаждающих и триботехнических характеристик водорастворимых СОЖ.

Следует заметить, что при выборе наиболее эффективной СОЖ по триботехническим характеристикам при испытаниях по ГОСТ 9490 на четырехшариковой машине трения не наблюдалось принципиальной разницы в определяемых показателях между эмульсиями, особенно по показателю – «нагрузка сваривания». Поэтому в данной работе испытания водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей проводили при разных скоростях скольжения на ЧМТ-1. Для этого на четырехшариковую машину трения был установлен частотный преобразователь и редуктор. Это позволило проводить испытания при скорости скольжения трущейся пары в диапазоне 400-1470 об/мин, что соответствует линейной скорости (скорости скольжения) в пределах 0,173-0,639 м/сек.

На рисунке 4 показаны экспериментальные зависимости нагрузки сваривания от скорости вращения верхнего шарика, при испытаниях на четырехшариковой машине трения.

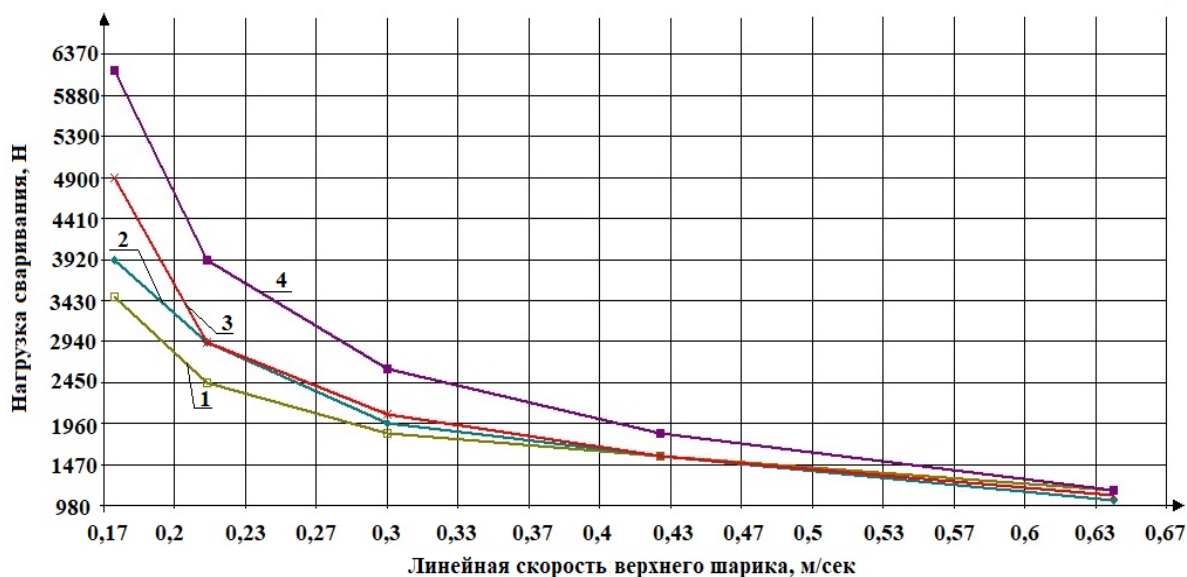


Рисунок 4 – Экспериментальные зависимости нагрузки сваривания от скорости вращения верхнего шарика, при испытаниях на четырехшариковой машине трения водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей, при различных концентрациях: 1 - Росойл-500 (5 % эмульсия); 2 - Росойл-500 (10 % эмульсия); 3 - Росойл-920 (5 % эмульсия); 4 – Росойл-920 (10 % эмульсия).

Установлено, что при стандартной скорости вращения верхнего шарика на ЧМТ-1 – 1470 об/мин или 0,639 м/секунду, согласно ГОСТ 9490, различий в величине нагрузки сваривания, для исследуемых СОЖ и соответственно двух различных концентраций, не наблюдается. С уменьшением скорости вращения

верхнего шарика нагрузка сваривания значительно увеличивается (более чем в 3 раза) и наблюдается существенное отличие в противозадирных свойствах между исследуемыми СОЖ и их концентрациями в воде.

Для определения влияния содержания масла И-20А в концентрате СОЖ на охлаждающие характеристики эмульсий были изготовлены концентраты СОЖ с различным содержанием минерального масла, из которых были приготовлены эмульсии с 5% концентрацией в воде. Также для сравнения были использованы СОЖ отечественного производства «Росойл-920» (не содержит в рецептуре минерального масла) и «Росойл-500» (содержит в рецептуре 90% минерального масла).

На рисунке 5 показана зависимость нагрузки сваривания от содержания масла И-20А в концентратах СОЖ при скорости испытаний 0,174 м/сек (400 об/мин), для 5 % эмульсий СОЖ.

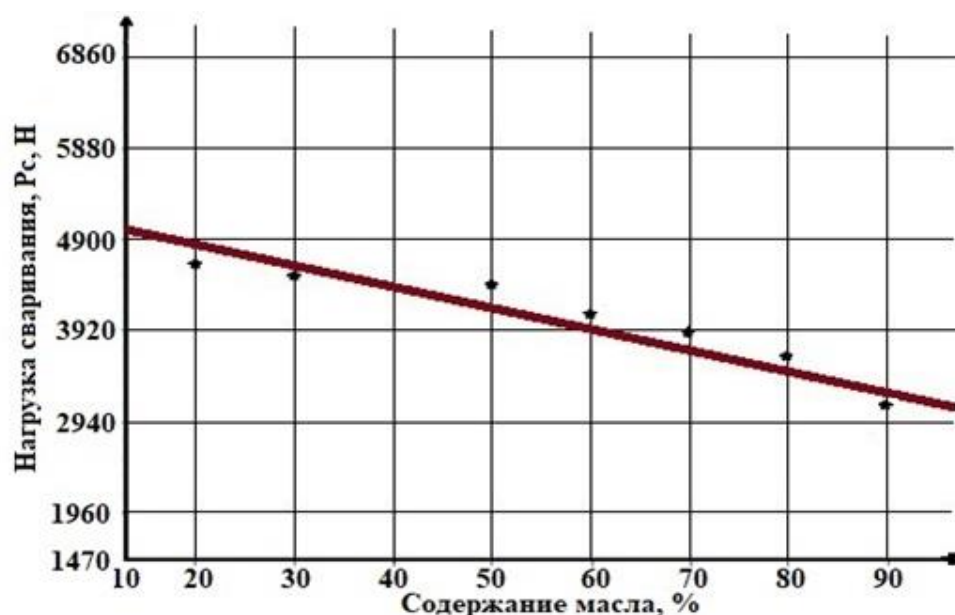


Рисунок 5 – Зависимость нагрузки сваривания от содержания масла И-20А в концентратах СОЖ при скорости испытаний 0,173 м/сек для 5 % эмульсий СОЖ.

Выявлено, что при скорости испытаний 0,173 м/сек с увеличением концентрации в СОЖ масляной составляющей от 0 до 90 % нагрузка сваривания уменьшается с 4635 Н до 3283 Н.

Следует отметить, что полученные зависимости справедливы только в рамках проведенных исследований, с учетом следующих ограничений:

- испытывались минеральные масляные СОЖ различной вязкости без серу-хлор-фосфор-содержащих присадок, а также водосмешиваемые СОЖ (эмульсии) с различным содержанием минерального масла;
- растительные, синтетические и прочие масла в данной работе не исследовались.

В настоящее время результаты данной работы используются, как при разработке импортозамещающих новых СОЖ и технических требований к ним, так и при контроле качества выпускаемых смазочно-охлаждающих жидкостей для процессов металлообработки.

Заключение

1. Разработан комплекс методов по определению охлаждающих характеристик СОЖ, позволяющий в автоматическом режиме определять: время

охлаждения от температуры 850 °С до температур 600 °С, 400 °С и 200 °С; максимальную скорость охлаждения; температуру при максимальной скорости охлаждения; скорость охлаждения при 300 °С и получать графические зависимости «температура - время охлаждения» и «температура - скорость охлаждения».

2. Выявлены зависимости охлаждающих характеристик от кинематической вязкости и плотности масляных смазочно-охлаждающих жидкостей. Показано, что при увеличении вязкости масляных СОЖ при 40 °С с 7 сСт до 708 сСт, температура при максимальной скорости охлаждения увеличивается с 542 °С до 715 °С, скорость охлаждения при 300 °С уменьшается с 6,2 °С/с до 4,3 °С/с, а время охлаждения от 850 до 600 °С уменьшается с 6,7 до 4,8 секунд.

3. Выявлены зависимости между охлаждающими и триботехническими характеристиками СОЖ, применяемыми в процессах металлообработки. Установлено, что для масляных СОЖ с увеличением температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения, от 542 °С до 692 °С, увеличивается нагрузка сваривания от 1166 Н до 1646 Н и уменьшается пятно износа от 1,48 мм до 0,73 мм, определяемые на ЧМТ-1 по ГОСТ 9490.

4. Установлена разница в противозадирных свойствах водорастворимых СОЖ в зависимости от скорости скольжения (вращения) верхнего шарика, при испытаниях на четырехшариковой машине трения ЧМТ-1. С уменьшением скорости скольжения (вращения) верхнего шарика с 0,639 м/сек до 0,174 м/сек, нагрузка сваривания повышается более чем в 3 раза.

5. Установлено влияние содержания масла И-20А в концентрате водорастворимых СОЖ на охлаждающие и триботехнические характеристики 5% эмульсий, приготовленных из этих концентратов. Выявлено, что с увеличением содержания масла И-20А в концентрате СОЖ от 0 до 90%, уменьшаются максимальная скорость охлаждения с 133 °С/с до 51 °С/с и температура, при которой она обеспечивается, с 536 °С до 314 °С, а нагрузка сваривания уменьшается с 4635 Н до 3283 Н.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энтелис С.Г., Берлинер Э.М. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник. М.: Машиностроение, 2-е изд., перераб. и доп.1995. 496 с.

2. Худобин Л.В., Бабичев А.П., Бульжев Е.М. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.

3. Шашин А. Д. Исследование влияния СОЖ на процесс взаимодействия инструмента и заготовки при обработке металлов резанием: дис... канд. технич. наук: 05.03.01: Московский государственный индустриальный университет / Шашин Андрей Дмитриевич. - Москва, ГОУ МГИУ, 2003. - 118 с.

4. Бердичевский У.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1984, - 224 с.

5. Кисель А.Г., Реченко Д.С., Титов Ю.В., Пуртов Е.Д., Петров И.В.А. Подбор смазочно-охлаждающей среды для чистой обработки. Системы. Методы. Технологии 2015 № 3 (27) с. 39-43.

6. <https://www.sites.google.com/site/cuttingofmaterials/5-3>

7. Шолом В.Ю, Абрамов А.Н., Казаков А.М., Шолом А.В., Иванов В.В. Установка для определения охлаждающих характеристик технологических сред // КШП ОМД. 2014. № 5. С.30–33.

8. Патент РФ № 2699698. Установка для определения охлаждающей способности

технологической среды / Шолом А.В., Поляков А.Б., Тюленев Д.Г., Иванов В.В., Волкова Е.Б., № 2018125812; заявл. 12.07.2018; опубл. 09.09.2019, Бюл. № 25.

9. ISO 9950:1995(E). Industrial quenching oils Determination of cooling characteristics - Nickel-alloy probe test method. - Geneve: International Organization for Standardization, 1995. - 9 p.

10. ASTM D6482 - 06(2016) Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Aqueous Polymer Quenchants by Cooling Curve Analysis with Agitation (Tensi Method), 2016. - 9 p

11. ASTM D6200 - 01(2017) Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analys, 2017. - 6 p.

12. Тюленев Д. Г., Абрамов А. Н., Шолом В. Ю., Шолом А. В., Поляков А. Б. Исследование охлаждающей способности смазочно-охлаждающих жидкостей // КИП ОМД. 2019. № 4. С.34–41.

13. Шолом, А. В. Охлаждающие и триботехнические характеристики масляных смазочно-охлаждающих жидкостей // Вестник УГАТУ. – 2023. – Т.27. № 2 (100) – С. 148-153.

14. Шолом, А. В. Влияние плотности и вязкости масляных смазочно-охлаждающих жидкостей на их охлаждающие характеристики. [Текст] / А.В. Шолом // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 3. – С. 77-83.

15. Шолом, А. В. Импортозамещение СОЖ для процессов металлообработки на машиностроительных предприятиях [Текст] / С.М. Пилюгин, А.Н. Абрамов, В.С. Жернаков, Д.Г. Тюленев // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 12. – С.42-49.

A. V. Sholom
Self-supporting creative center of the Ufa Aviation Institute,
Ufa, Russia, rosoil@rosoil.ru

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN COOLANT AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF CUTTING FLUIDS

Abstract

The paper presents the results of studies aimed at determining the effect of the cooling properties of oil cutting fluids (coolants) used in various metalworking processes on their tribotechnical characteristics. The design and brief description of the UZS-2 unit are given, which makes it possible to assess the cooling characteristics of coolant and obtain "temperature-time" and "temperature-velocity" dependencies for various liquids. Experimental dependencies of the tribotechnical properties of the tested oil coolants on their cooling characteristics have been established. It is shown that with an increase in temperature, at which the maximum coolant cooling rate is ensured, the anti-scuffing and anti-wear properties of coolant, determined according to GOST on a four-ball friction machine, increase.

Keywords: cutting fluid; cooling characteristics; maximum cooling rate; tribotechnical properties; welding load.