

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.892
doi: 10.30987/2782-5957-2023-12-63-70

ОХЛАЖДАЮЩИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАСЛЯНЫХ СОЖ

Андрей Владимирович Шолом^{1✉}, Семен Михайлович Пилюгин², Алексей Николаевич
Абрамов³, Владимир Юрьевич Шолом⁴

^{1,2,3,4} Хозрасчётный творческий центр Уфимского авиационного института, Уфа, Россия

¹ asholom@mail.ru

² pilyugin@rosoil.ru

³ abramov@rosoil.ru

⁴ rosoil@rosoil.ru

Аннотация

В работе приведены результаты исследований, целью которых являлось определение влияния охлаждающих свойств масляных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), применяемых в различных процессах металлообработки. Приведена конструкция и краткое описание установки, которая позволяет получать зависимости «температура-время», «температура-скорость» различных жидкостей. Применение данной установки позволяет осуществить выбор СОЖ по охлаждающим свойствам в зависимости от требуемых техпроцессом диапазона температур. Представлены результаты оценки охлаждающих свойств СОЖ на уста-

новке УЗС-2, изготовленной по требованиям международных стандартов ISO 9950, ASTM D6200 - 01 и ASTM D6482 – 06. Выявлены 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 на четырехшариковой машине трения.

Ключевые слова: жидкость, характеристики, скорость, охлаждение, триботехнические свойства, нагрузка, сваривание.

Ссылка для цитирования:

Шолом А.В. Охлаждающие и триботехнические характеристики масляных СОЖ / А.В. Шолом, С.М. Пилюгин, А.Н. Абрамов, В.Ю. Шолом // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 12. – С. 63-70. doi: 10.30987/2782-5957-2023-12-63-70.

Original article
Open Access Article

COOLING AND TRIBO-ENGINEERING CHARACTERISTICS OF OIL LUBRICANTS

Andrey Vladimirovich Sholom^{1✉}, Semyon Mikhailovich Pilyugin², Aleksey Nikolaevich
Abramov³, Vladimir Yuryevich Sholom⁴

^{1,2,3,4,5} Self-supporting Creative Center of Ufa Aviation Institute, Ufa, Russia

¹ asholom@mail.ru

² pilyugin@rosoil.ru

³ abramov@rosoil.ru

⁴ rosoil@rosoil.ru

Abstract

The paper presents the results of studies aimed at defining the effect of the cooling properties of oil lubricants used in various metalworking processes. The design and a brief description of the installation are given, which allows to obtain temperature-time, tem-

perature-velocity dependencies of various liquids. The use of this installation gives the opportunity to select lubricants according to its cooling properties, depending on the temperature range required by the process. The assessment results of lubricant cooling properties

at Y3C-2 installation, manufactured according to the requirements of international standards ISO 9950, ASTM D6200 - 01 and ASTM D6482 – 06 are presented. The dependences of tribo-engineering properties of the tested oil lubricants on their cooling characteristics are found out. It is shown that with an increase

Reference for citing:

Sholom AV, Pilyugin SM, Abramov AN, Sholom VYu. Cooling and tribo-engineering characteristics of oil lubricants. Transport Engineering. 2023;12:63-70. doi: 10.30987/2782-5957-2023-12-63-70.

Введение

В настоящее время смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) широко применяются на различных этапах металлообработки.

Их смазывающее действие предназначено для уменьшения сил трения, изнашивания, схватывания, задираобразования и фрикционного нагрева поверхностей используемого инструмента и заготовки.

Эти характеристики, в свою очередь, зависят от охлаждающих характеристик применяемых СОЖ.

Охлаждающие свойства СОЖ определяют эффективность охлаждения зоны резания. Стабилизация этой температуры оказывает значительное влияние как на стойкость инструмента (возможность ужесточения режимов обработки), так и на качество формируемой поверхности детали. При эффективном охлаждении зоны резания снижается вероятность возникновения неблагоприятной эпюры внутренних остаточных напряжений в поверхностном слое, макроотклонений из-за температурных деформаций, существенно возрастает стойкость инструмента [1]. 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 поло-

Цель исследований

Целью исследований является установление взаимосвязи между охлаждающими и триботехническими характери-

Материалы и методы исследования

В «Технопарке ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ» для достижения этой цели и решения соот-

in the temperature at which the maximum cooling rate of the lubricant is provided, its extreme pressure and anti-wear properties determined according to GOST on a four-ball friction machine increase.

Keywords: liquid, characteristics, rate, cooling, tribo-engineering properties, load, welding.

жения вытекает что, поддерживая постоянную оптимальную температуру резания, можно осуществлять процесс резания в оптимальном режиме при минимальной интенсивности изнашивания режущего инструмента [6].

Триботехнические характеристики СОЖ определяются с помощью многих широко известных методов и оборудования. Как правило, полную информацию о них производители предоставляют в технической документации, прилагаемой к данной СОЖ.

В то же время охлаждающие характеристики СОЖ чаще всего задаются лишь качественно, без количественной оценки. Метрологическая составляющая для оценки данного свойства развита недостаточно – нет специальных методик и лабораторного оснащения. И в целом исследователями и разработчиками СОЖ при испытаниях и определении эффективности СОЖ, недостаточное внимание уделяется их охлаждающим свойствам [2-5].

Постоянно возникает вопрос о комплексной оценке взаимосвязи охлаждающих и триботехнических свойств различных СОЖ для применения их на конкретных видах металлообработки. Следовательно, установление взаимосвязи охлаждающих и триботехнических характеристиках СОЖ является актуальной задачей.

ками масляных смазочно-охлаждающих жидкостей, широко применяемых в процессах металлообработки.

ветствующих научно-технических задач были разработаны соответствующие мето-

дики и создана специальная установка [7, 8].

Установка предназначена для определения охлаждающих характеристик различных сред, таких как водные растворы полимеров, солей и других жидкостей, применяемых в машиностроении и метал-

лургии, в соответствии с требованиями международных стандартов ISO 9950 (1999 г.), ASTM D6200 – 01 (2017 г.) и ASTM D6482 - 06 (2016 г.) [9-11]. На рис. 1 показан общий вид установки (а) и схема установки (б) [12].

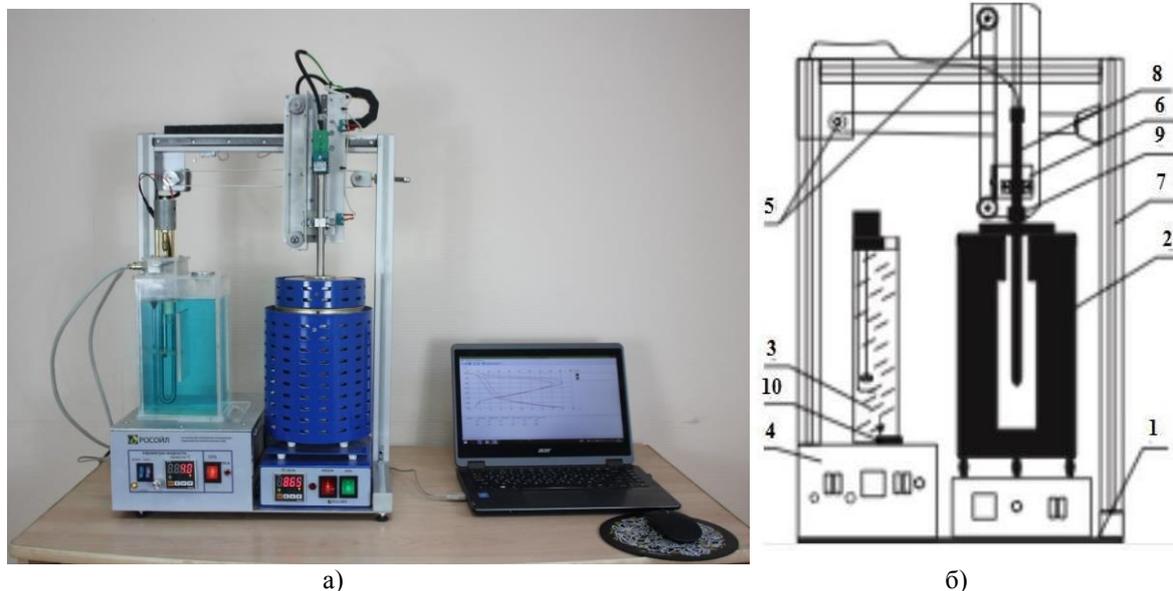


Рис. 1. Внешний вид установки – а) для определения охлаждающих характеристик технологических и закалочных жидкостей и схема установки с механизмом переноса термодатчика – б): 1 – основание; 2 – печь; 3 – ёмкость с подогревом и перемешивающим устройством; 4 – блок управления; 5 – шаговые двигатели; 6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

Fig. 1. Exterior view of the unit (a) for determining the cooling characteristics of process and quenching liquids and the diagram of the unit with the transfer mechanism of the thermal sensor (b): 1 – base; 2 – furnace; 3 – container with heating and agitator; 4 – control unit; 5 – stepper motors; 6 – temperature sensor holder; 7 – U-shaped vertical rack; 8 – temperature sensor; 9 – plug bushing; 10 – guides

Принцип работы установки основывается на исследовании процесса остывания образца помещенного в ванну из исследуемой СОЖ. Предварительно нагретый до определенной температуры термодатчик погружается в СОЖ и ведется фиксации изменения температуры во времени.

Используется оригинальный термодатчик на основе термопары. 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 система регистрирует, обрабатывает параметры охлаждения термодатчика (8) и выводит на дисплей монитора графики «температура-время», «температура-скорость», значения времени

охлаждения от температуры 850 °С до температур 600 °С, 400 °С и 200 °С, максимальную скорость охлаждения, температуру при максимальной скорости охлаждения, а также скорость охлаждения при 300 °С. Нагрев термодатчика осуществляется в трубчатой печи (2) до температуры 850 ± 5 °С [12].

Исследование с помощью данной установки охлаждающего действия СОЖ, позволяет оценить эту характеристику для различных марок СОЖ, а осуществить выбор охлаждающей среды с наиболее приемлемой охлаждающей способностью для определенного температурного диапазона. Установка применима для исследования СОЖ как на водной, так и масляной основе.

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе были проведены исследования охлаждающих характеристик и триботехнических свойств минеральных масел различной кинематической вязкости. Эти масла являются основой для ряда часто используемых СОЖ или используются без дополнительных добавок (зубообработка, нарезание резьб и т.п.).

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 из сернистых нефтей КС-19 ГОСТ 9243-75;

Исследования этих масел проведены на описанной выше установке. Эксперименты повторялись 5 раз, численные значения подвергались статистической обработке. На рис. 2 показаны характерные кривые «температура-время охлаждения», «температура-скорость охлаждения» для различных масел [12].

В табл. 1 приведены средние значения охлаждающих характеристик исследуемых масел (по пяти повторениям).

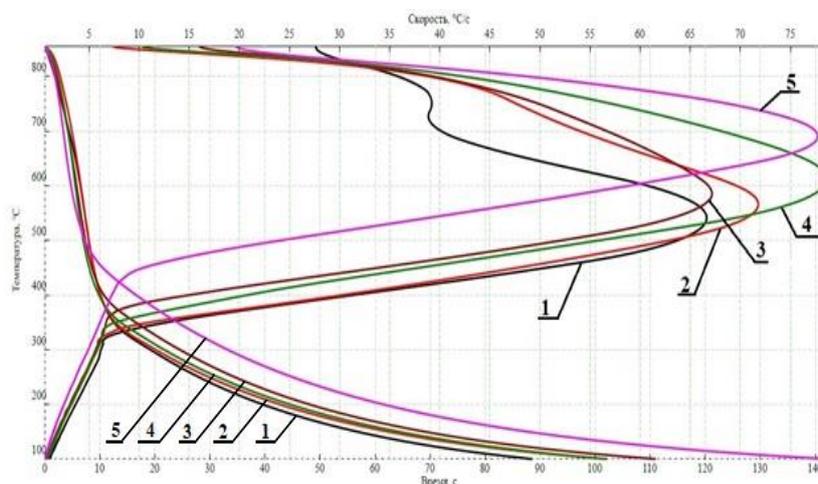


Рис. 2. Зависимости «температура-время охлаждения», «температура-скорость охлаждения» для различных масел: 1 – И-5А; 2 – И-12А; 3 – И-20А; 4 – И-40А; 5 – КС-19

Fig. 2. "Temperature-cooling time" and "temperature-cooling rate" dependencies for different oils: 1 – И-5А; 2 – И-12А; 3 – И-20А; 4 – И-40А; 5 – КС-19

Таблица 1

Плотность, вязкость и охлаждающие характеристики испытуемых масляных СОЖ [12]

Table 1

Density, viscosity and cooling characteristics of the tested oil lubricants [12]

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

Установлено, что с увеличением кинематической вязкости и плотности исследуемых минеральных масел увеличивается температура, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения инструмента и заготовки, а также уменьша-

ются время охлаждения до 600 °С и скорость охлаждения при 300 °С.

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

На рис. 3 показана зависимость температуры, при которой обеспечивается

максимальная скорость охлаждения от кинематической вязкости масел.

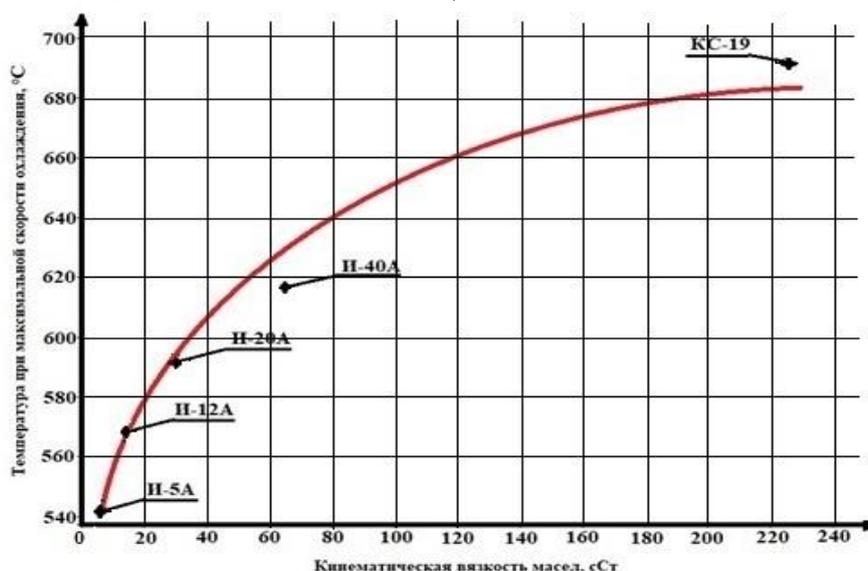


Рис. 3. Зависимость температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения, от кинематической вязкости масел при температуре 40 °С

Fig. 3. The dependence of the temperature at which the maximum cooling rate is provided on the kinematic viscosity of oils at a temperature of 40 °C

Полученную зависимость на рис. 3 можно описать формулой:

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

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

Для технологических операций металлообработки наиболее важными и широко применяемыми являются противозадирные и противоизносные свойства СОЖ, которые должны обеспечивать высокое качество обработанной поверхности детали и максимальную стойкость инструмента. Поэтому именно они были выбраны для оценки триботехнических характеристик.

Взаимосвязь между охлаждающими и триботехническими характеристиками СОЖ необходимо будет определять по нагрузке сваривания и диаметру пятна износа, определяемым по ГОСТ 9490-75, и температуре, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения для каждой СОЖ, определяемой по ISO 9950, ASTM D6200 - 01 и ASTM D6482 – 06.

В табл. 2 приводятся результаты испытаний триботехнических характеристик исследуемых минеральных масел.

Аппроксимируя зависимость нагрузки сваривания (P_c) от вязкости (v), получа-

ем формулу (3):

$$P_c = 1,69v + 1295,9 \quad (2)$$

где P_c – нагрузка сваривания, v – кинематическая вязкость.

Аппроксимируя зависимость диаметра пятна износа ($D_{\text{и}}$) от вязкости (v), получаем формулу (4):

$$D_{\text{и}} = -0,00v + 1,27 \quad (3)$$

где $D_{\text{и}}$ – диаметра пятна износа, v – кинематическая вязкость.

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.

Объединяя формулу (1) описывающую зависимость температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения масляных СОЖ и зависимости триботехнических характеристик от вязкости масляных СОЖ, формулы (2) и (3), получаем зависимости нагрузки сваривания (линия 1) и диаметра пятна износа (линия 2) от температуры, при максимальной скорости охлаждения для масляных СОЖ, изображенные на рис. 4.

Viscosity and tribo-engineering characteristics of the tested oil lubricants

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

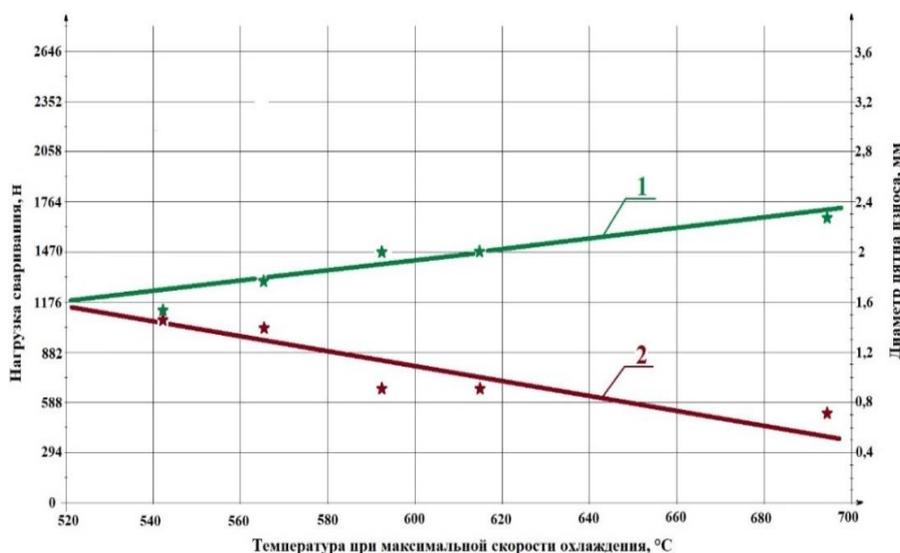


Рис. 4. Зависимость нагрузки сваривания и диаметра пятна износа от температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения

Fig. 4. The dependence of the welding load on the temperature at which the maximum cooling rate is achieved

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

$$P_c = 0,31 \cdot T_{\text{мсо}} - 42,08, \quad (5)$$

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:

$$D_{и} = -0,01 T_{\text{мсо}} + 4,51, \quad (6)$$

где $D_{и}$ – диаметр пятна износа, $T_{\text{мсо}}$ – температура, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения.

Из рис. 4 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.

Таким образом, выявлены зависимости между охлаждающими и триботехническими характеристиками смазочно-охлаждающих жидкостей.

Заключение

1. Определены охлаждающие характеристики масляных СОЖ, применяемые в процессах металлообработки, с помощью установки УЗС-2 для оценки охлаждаю-

щих характеристик технических жидкостей.

2. Показано, что с ростом вязкости масляных смазочно-охлаждающих жидко-

стей, повышаются их охлаждающие и триботехнические характеристики.

3. Выявлены зависимости триботехнических свойств испытуемых масляных СОЖ от их охлаждающих характеристик. Установлено, что с увеличением темпера-

туры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения СОЖ, повышаются противозадирные и противоизносные свойства СОЖ, определенные по ГОСТ 9490.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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., Булыжев 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 чистовой обработки. Системы. Методы. Технологии 2015 № 3 (27) с. 39-43.
6. <https://www.sites.google.com/site/cuttingofmaterial/s/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 // КИШП ОМД. 2014. № 5. С.30–33.
8. Патент РФ № 2699698. Установка для определения охлаждающей способности технологиче-

- ской 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 Analysis, 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 // КИШП ОМД. 2019. № 4. С.34–41.
13. Шолом А.В., Пилюгин С.М., Абрамов А.Н., Тюленев Д.Г. Влияние охлаждающих характеристик масляных смазочно-охлаждающих жидкостей на их триботехнические свойства //Сб. трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова. Москва, 2022, Издательство: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (Москва), С. 299-302.

REFERENCES

1. Entelis SG, Berliner EM. Lubricating and cooling agents for metal cutting: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 1995.
2. Khudobin LV, Babichev AP, Bulyzhev EM. Lubricating and cooling agents and their application in cutting process: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 2006.
3. Shashin AD. Study of lubricant influence on the interaction between tools and workpiece in metal cutting [dissertation]. [Moscow (RF)]: Moskovsky Gosudarstvennyy Industrialnyy Universitet; 2003.
4. Berdichevsky UG. Lubricating and cooling agents for processing materials: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 1984.
5. Kisel AG, Rechenko DS, Titov YuV, Purtov ED, Petrov IV. Selection of a lubricating and cooling

- medium for finishing. Systems. Methods. Technologies. 2015;3(27):39-43.
6. <https://www.sites.google.com/site/cuttingofmaterial/s/5-3>.
7. Sholom VYu, Abramov AN, Kazakov AM, Sholom AV, Ivanov VV. Installation for determining the cooling characteristics of technological media. Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure. 2014;5:30–33.
8. Sholom AV, Polyakov AB, Tyuleev DG, Ivanov VV, Volkova EB. Patent of the Russian Federation No. 2699698. Installation for determining the cooling capacity of a technological medium. 2019 Sep 09.
9. ISO 9950. International standard Industrial quenching oils - Determination of cooling characteristics.

Geneve: International Organization for Standardization; 1995.

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.
11. ASTM D6200 - 01(2017) Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis; 2017.
12. Tyulenev DG, Abramov AN, Sholom VYu, Sholom AV, Polyakov AB. Study of the cooling capacity of

lubricating and cooling liquids. Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure. 2019;4:34-41.

13. Sholom AV, Pilyugin SM, Abramov AN, Tyulenev DG. Influence of cooling characteristics of oil lubricating and cooling fluids on their tribology engineering properties. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th anniversary of AP Semenov. Moscow: Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences; 2022.

Информация об авторах:

Шолом Андрей Владимирович – инженер-исследователь ООО «ХТЦ УАИ», тел.+7(987)616-54-43.

Пилюгин Семён Михайлович – старший научный сотрудник ООО «ХТЦ УАИ», тел.+7(937)302-10-00.

Абрамов Алексей Николаевич – доктор технических наук, тел.+7(937)360-63-55, зам. ген. директора ООО «ХТЦ УАИ», член Межведомственного научного совета по трибологии Российской акаде-

мии наук, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и Союза научных и инженерных объединений.

Шолом Владимир Юрьевич – доктор технических наук, доцент, генеральный директор ООО «ХТЦ УАИ», тел. +7(347)272-47-88, член Межведомственного научного совета по трибологии Российской академии наук, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и Союза научных и инженерных объединений.

Sholom Andrey Vladimirovich – Research Engineer of Self-supporting Creative Center of Ufa Aviation Institute; phone: +7(987)6165443.

Pilyugin Semyon Mikhailovich – Senior Research Associate of Self-supporting Creative Center of Ufa Aviation Institute; phone: +7(937)302-10-00.

Abramov Aleksey Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Deputy Director General of Self-supporting Creative Center of Ufa Aviation Institute, Member of the Interdepartmental Scientific Council on Tribology of the Russian Academy of Sciences, the Ministry of

Science and Higher Education of the Russian Federation and the Union of Scientific and Engineering Associations; phone: +7(937)360-63-55.

Sholom Vladimir Yuryevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director General of Self-supporting Creative Center of Ufa Aviation Institute, Member of the Interdepartmental Scientific Council on Tribology of the Russian Academy of Sciences, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and the Union of Scientific and Engineering Associations; phone: +7(347)272-47-88.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 10.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023; принята к публикации 27.11.2023. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 10.11.2023; approved after review on 23.11.2023; accepted for publication on 27.11.2023. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.