

УДК 621.91

Подбор смазочно-охлаждающей жидкости для чистовой обработки

А.Г. Кисель^{1 a}, Д.С. Реченко^{1 b}, Ю.В. Титов^{1 c}, Е.Д. Пуртов^{1 d}, И.В. Петров^{2 e}¹Омский государственный технический университет, пр. Мира 11, Омск, Россия²АО НПЦ газотурбостроения «Салют», ул. Б. Хмельницкого 283, Омск, Россия^akisel1988@mail.ru, ^brechenko-denis@mail.ru, ^ctyrin-88@mail.ru, ^dJohn_4_tip@mail.ru, ^eigorgrey2@gmail.com

Статья поступила 20.04.2015, принята 18.06.2015

В настоящее время большое внимание уделяется совершенствованию технологии механической обработки, повышению производительности и точности обработки деталей машин, повышению стойкости инструмента. Использование новых смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) на некоторых операциях обработки металлов резанием позволяет в 2-4 раза повысить стойкость инструмента, в несколько раз уменьшить высоту микронеровностей обработанной поверхности и остаточные напряжения, увеличить производительность обработки, снизить затраты энергии на резание. Номенклатура СОЖ постоянно изменяется в связи с возрастающими требованиями по производительности и качеству обработки. Результаты испытаний различных СОЖ, проведенные с разными инструментальными и обрабатываемыми материалами, трудно сопоставимы. Если при подборе инструментальных материалов достаточно учитывать два-три показателя (например, теплоустойчивость и твердость), то для СОЖ такие критерии не найдены. Исследование сложных и многообразных процессов, происходящих в зоне резания, затрудняют большие градиенты температур и давлений в тонких поверхностных слоях, высокие скорости деформаций. Повышение технологической эффективности СОЖ является комплексной многокритериальной проблемой. В данной работе представлен анализ существующих методов оценки и подбора СОЖ для металлообработки. Обоснована оценка охлаждающего действия СОЖ с помощью разработанной и запатентованной установки по показателю $K_{охл}$. Представлены методика проведения экспериментальных исследований и результаты оценки охлаждающего действия испытанных СОЖ. Проведенные исследования позволяют выполнить выбор наиболее эффективной марки СОЖ для чистовой обработки по наименьшему значению показателя $K_{охл}$. Однако для обеспечения наилучшего охлаждающего действия непосредственно при резании необходимо также максимально эффективное подведение СОЖ в зону обработки.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость; охлаждающее действие; чистовая обработка; стойкость инструмента.

Selection of coolant-cutting fluid for final machining

A.G. Kisel^{1 a}, D.S. Rechenko^{1 b}, Yu.V. Titov^{1 c}, E.D. Purtov^{1 d}, I.V. Petrov^{2 e}¹Omsk State Technical University; 11, Mira Ave., Omsk, Russia²JSC «Salyut» Gas Turbine Engineering Research and Production Center; 283, B. Hmelniysky St., Omsk, Russia^akisel1988@mail.ru, ^brechenko-denis@mail.ru, ^ctyrin-88@mail.ru, ^dJohn_4_tip@mail.ru, ^eigorgrey2@gmail.com

Received 20.04.2015, accepted 18.06.2015

Currently, much attention is given to improving machining technology, productivity and machining accuracy of machine parts as well as increasing tool life. The use of new coolant-cutting fluids on some metal cutting operations allows increasing the tool life up to 2-4 times, reducing the height of the microscopic irregularities of the treated surface and the residual stresses up to several times, increasing the processing performance and reducing energy costs for cutting. Nomenclature of coolant-cutting fluids is constantly changing due to the increasing demands on productivity and processing quality. The test results for various coolant-cutting fluids, conducted with different instrumental and processing materials, are difficult to compare. If, to select tool materials, it is sufficient to consider two or three indicators (such as heat resistance, hardness), so such criteria for the coolant-cutting fluids have not been found. The study of complex and diverse processes in the cutting zone hampers large temperature and pressure gradients in thin surface layers as well as high strain rate. Increase of technological efficiency of coolant-cutting fluids is complex multi-criteria problem. This paper presents an analysis of the existing methods of evaluation and selection the coolant-cutting fluids for metal cutting. Reasonable evaluation has been presented for the cooling effect of the coolant-cutting fluids using developed and patented installation in terms of K_{ohl} . A technique has been given for experimental studies as well as the results of evaluation of the cooling effect of the tested cutting fluids. The research enables to select the most effective brand of coolant-cutting fluids used for final machining according to the lowest index K_{ohl} . However, to ensure the best cooling effect when cutting, the most effective settlement of coolant-cutting fluids must be done for the processing zone.

Key words: coolant-cutting fluid; cooling effect; final machining; tool life.

Введение. При чистовой обработке различных материалов для обеспечения требуемых показателей точности, качества и производительности выбирают воз-

можно низкие значения подачи и припуска и возможно высокое значение скорости резания в зависимости от материала детали и параметров инструмента. Как от-

мечается в ряде исследований [1–4], при чистовой обработке из-за принятых режимов попадание смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в зону резания затруднено. В связи с этим СОЖ, основные функциональные действия которых — смазочное и охлаждающее, не обеспечивают своих смазочных свойств, а, возможно, лишь теплоотведение от тех мест, куда СОЖ попадают (от нагретых участков заготовки, инструмента и стружки).

Таким образом, при подборе эффективных СОЖ для чистовых операций необходимо руководствоваться их охлаждающими свойствами.

Снижение температуры позволяет повысить стойкость инструмента, точность и качество обработки детали (шероховатость поверхности), а также снизить остаточные напряжения в детали [5–9].

Повышение точности и снижение шероховатости детали при обработке с СОЖ происходит благодаря снижению температурных деформаций инструмента и заготовки [10–13]. Помимо этого за счет разности температур наружной и внутренней сторон стружки улучшается ее завивание, что снижает риск приваривания стружки к инструменту и обеспечивает снижение сил резания [3; 14].

Постановка и решение задачи. Несмотря на разработку большого количества марок СОЖ и активно ведущиеся испытания в данной области, не существует единой методики, обеспечивающей выбор наиболее эффективной СОЖ. В настоящее время вопрос выбора марки СОЖ решается либо на основе рекомендаций фирм-производителей этих жидкостей, либо на основе собственного опыта их эксплуатации, либо по ценовому показателю [3; 13].

В настоящее время охлаждающее действие СОЖ оценивают как при испытаниях на металлорежущих станках в процессе обработки, так и на специализированных установках. Однако оценка непосредственно во время обработки требует высоких затрат времени, материалов и самой СОЖ. Поэтому наиболее актуальной является оценка СОЖ на экспериментальных установках. Применение таких установок обеспечивает снижение расхода материалов, СОЖ и времени испытаний, а также исключает влияние других функциональных действий, что обеспечивает наиболее точные результаты.

Согласно исследованиям [1; 2] основной характеристикой охлаждающего действия СОЖ является коэффициент теплоотдачи, т. е. помимо информации об охлаждающем действии дает возможность: а) определить стойкость режущего инструмента и температуру в зоне резания; б) рассчитать износ инструмента и спрогнозировать характер разрушения режущих лезвий в различных условиях работы; в) правильно подбирать материалы режущего инструмента для работы в тех или иных условиях; г) оценивать влияние охлаждения на ход резания и отыскивать пути к наиболее эффективному использованию охлаждающей среды; д) регу-

лировать ход процесса для получения нужного теплового воздействия на обрабатываемый материал и поверхностные слои детали [1; 2]. Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{q}{(t_{\text{и}} - t_{\text{СОЖ}})}, \quad (1)$$

где q — удельный тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$; α — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $t_{\text{и}}$ — температура режущего инструмента, К ; $t_{\text{СОЖ}}$ — температура СОЖ, К .

Чем больше коэффициент теплоотдачи, тем лучше СОЖ отводит тепло от режущего инструмента, стружки и детали. Теплоотвод при резании происходит вследствие конвекции, теплопроводности излучения и химических реакций, происходящих с поглощением тепла, т. е. процессов, сопровождающихся сложным тепло- и массообменом.

В литературе [3] приводится методика расчета охлаждающего действия СОЖ. Однако любой из таких расчетов всегда имеет какие-либо допущения, и поэтому его результат не всегда близок к реальным показателям.

В процессе резания изменение температуры определяют, например, с помощью датчиков температуры, подсоединенных к режущему инструменту, а также с помощью современных тепловизоров. Однако недостатком испытаний охлаждающего действия на металлорежущих станках является невозможность определения температуры непосредственно в зоне резания. Это происходит из-за того, что измерительные устройства физически невозможно установить в зоне обработки. Подводимая СОЖ при этом также мешает наблюдениям. Поэтому наиболее оптимальными являются испытания охлаждающего действия с помощью лабораторных установок.

Охлаждающее действие часто оценивают по скорости охлаждения в испытуемой СОЖ термпары, нагретой до температуры резания. Наиболее прогрессивными являются градиентные методы определения температурной зависимости коэффициента теплоотдачи, по которым определяют температуру в двух точках (на самой охлаждаемой поверхности и в непосредственной близости от нее) и далее преобразуют градиент температур в тепловой поток в соответствии с законом Фурье [15; 16].

Существуют методы, по которым охлаждающее действие СОЖ оценивают по таким показателям, как темп охлаждения или конечная температура нагретого металлического образца в определенном объеме или в набегающем потоке исследуемой жидкости [15; 16; 18; 19].

Недостатками существующих установок для проведения испытаний охлаждающего действия СОЖ при точении является то, что испытания не позволяют моделировать процесс обработки. В данных устройствах СОЖ находится в неподвижном состоянии, и при

этом вокруг датчика температуры образуется паровая рубашка.

Поэтому в работе применялся стенд, позволяющий в процессе испытаний перемешивать СОЖ, что не только устраняет возможность образования паровой рубашки, но и моделирует процесс течения СОЖ. Следовательно, применение данного стенда позволяет приблизиться к условиям металлообработки, что повысит достоверность полученных данных.

Для определения охлаждающей способности применялась установка «Компатон», предназначенная для определения охлаждающей способности закалочных сред, применяемых для обработки металлов и их сплавов. Схема стенда, использованного в работе, представлена на рис. 1. На стенд получен патент на полезную модель [20].

Исследование с помощью данного стенда охлаждающего действия различных СОЖ позволяет осуществить выбор СОЖ с наибольшей охлаждающей способностью.

Исследования проводились на следующих марках СОЖ: Addinol WN430, Blasocut 4000, Укринол-1М, Sinertek ML, Росойл-500, Аквол-6, Экол-Б2. Помимо этого исследования проводились без применения СОЖ.

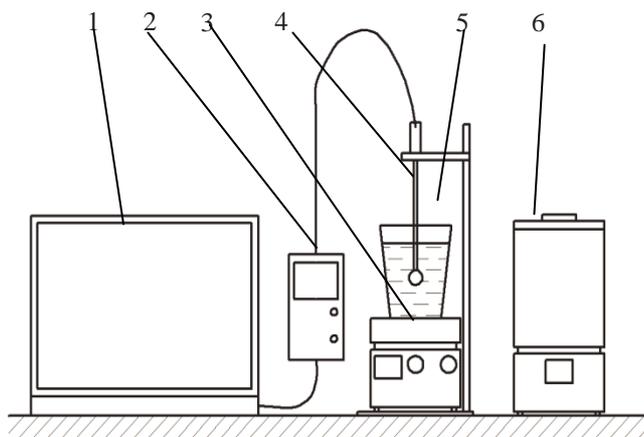


Рис. 1. Схема стенда для оценки охлаждающего действия СОЖ: 1 — ЭВМ; 2 — термометр ТЦ-3 ММ-5; 3 — мешалка магнитная; 4 — датчик температуры ТХА-720; 5 — емкость для исследуемой СОЖ; 6 — печь сопротивления

Методика проведения исследований. Испытания проводились следующим образом. Исследуемая СОЖ заливалась в емкость 5 (рис. 1) и при помощи магнитной мешалки 3 постоянно перемешивалась. Датчик температуры 4 нагревался до температуры 710 °С в печи сопротивления 6, после чего погружался в емкость 5, а изменения температуры датчика 4 измерялись цифровым термометром 2 и фиксировались в течение всего времени изменения значений температуры на ЭВМ 1 с помощью специализированной программы TC-Soft. Далее по полученным данным строились графики изменения температуры $T, ^\circ\text{C}$, и скорости охлаждения $V_{\text{охл}}, ^\circ\text{C}/\text{c}$, для каждой марки СОЖ и при охлаждении

на воздухе. На рис. 2 и 3 представлен общий вид получаемых графиков.

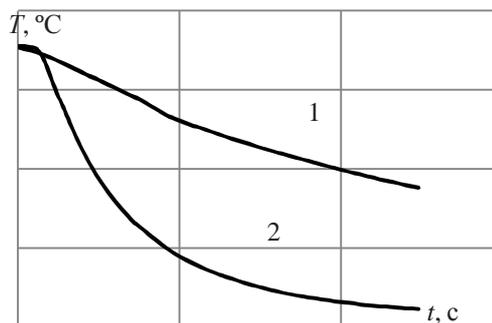


Рис. 2. Графики изменения температуры при охлаждении термопары на воздухе (1) и в исследуемой СОЖ (2)

Скорость охлаждения является переменной величиной, поэтому критерием оценки охлаждающего действия стала максимальная скорость охлаждения $V_{\text{охлmax}}$, позволяющая судить об охлаждающем действии в начальный момент времени.

Полученные результаты исследований представлены в табл. 1.

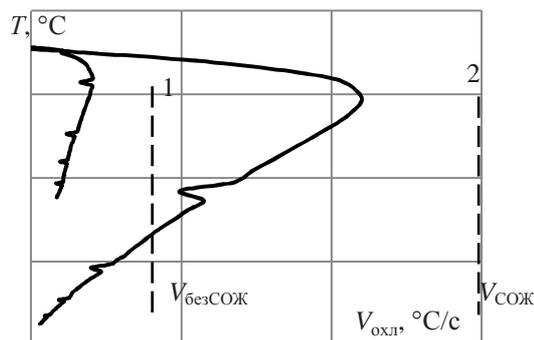


Рис. 3. Графики изменения скорости охлаждения термопары на воздухе (1) и в исследуемой СОЖ (2)

Таблица 1

Результаты исследований охлаждающего действия различных марок СОЖ

Марка СОЖ	Максимальная скорость охлаждения, °C/c
Без СОЖ	4,06
Addinol WN430	22,00
Blasocut 4000	20,70
Укринол-1М	22,60
Sinertek ML	21,4
Росойл-500	19,07
Аквол-6	20,24
Экол-Б2	20,9

Результаты и их обсуждение. Результаты проведенных исследований позволяют оценить охлаждающее действие и подобрать СОЖ для металлообработки по данному критерию.

Однако эффективность СОЖ по охлаждающему действию необходимо оценивать в сравнении с охлаждением без СОЖ (на воздухе). Поэтому в данной работе в качестве параметра охлаждающего действия предлагается коэффициент $K_{\text{охл}}$, который рассчитывается по выражению:

$$K_{\text{охл}} = \frac{V_{\text{безСОЖ}}}{V_{\text{СОЖ}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{безСОЖ}}$ — максимальная скорость охлаждения на воздухе, °C/c; $V_{\text{СОЖ}}$ — максимальная скорость охлаждения с применением испытанной СОЖ, °C/c.

Чем меньше значение $K_{\text{охл}}$, тем эффективнее марка СОЖ по охлаждающему действию. Достоинством данного показателя является то, что он отражает величину относительного изменения максимальной скорости охлаждения в исследуемой СОЖ. В случае, если данный показатель будет больше или равен единице, можно сделать вывод о неэффективности применения данной марки СОЖ.

В табл. 2 представлена эффективность испытанных марок СОЖ по охлаждающему действию в порядке снижения (увеличения $K_{\text{охл}}$).

По результатам исследований установлено, что наилучшее охлаждающее действие имеют СОЖ марок Укринол-1М, Addinol WH430 и Sinertek ML, так как они имеют наивысшую максимальную скорость охлаждения.

Таблица 2

Эффективность различных марок СОЖ по охлаждающему действию

Марка СОЖ	$K_{\text{охл}}$
Укринол-1М	0,180
Addinol WH430	0,185
Sinertek ML	0,190
Экол-Б2	0,194
Blasocut 4000	0,196
Аквол-6	0,201
Росойл-500	0,213

Не смотря на то, что предлагаемый показатель эффективности не характеризует процессов, происходящих в зоне резания, он позволяет выполнить сравнительную оценку теплофизических свойств СОЖ. Для обеспечения наилучшего охлаждающего действия непосредственно при резании необходимо также максимально эффективно подведение СОЖ в зону обработки.

Выводы

В работе выполнены экспериментальные исследования охлаждающего действия испытанных СОЖ. Представленные результаты позволяют подобрать наиболее эффективную марку СОЖ для чистовой обработки различных материалов. Результаты работы будут особенно полезны при производстве деталей, к которым предъявляют повышенные требования по качеству и точности обработки. Применение эффективной СОЖ обеспечивает максимально возможное снижение средней температуры резания, что способствует продлению срока службы инструмента, уменьшению шероховатости поверхности и повышению точности обработки.

Литература

1. Энтелис С.Г., Берлинер Э.М. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник. М.: Машиностроение, 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. техн. наук. М., 2003. 118 с.
4. Киселев Е.С. Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ. Ульяновск: УлГТУ, 2001. 171 с.
5. Kuram E., Ozelcik B., Demirbas E., Sik E. Effects of the cutting fluid types and cutting parameters on surface roughness and thrust force // Proceedings of the World Congress on Engineering. London, U.K. 2010. Vol. 2. P. 2306-2312.
6. Kuram E., Ozelcik B., Demirbas E. Environmentally friendly machining: Vegetable based cutting fluids // Green manufacturing processes and systems. Aveiro, Portugal. 2013. P. 23-48.
7. Mang T., Dresel W. Lubricants and lubrications. Weinheim: Wiley-VCH, 2001. 595 p.
8. Meister B.E. The identification of desirable parameters for aluminium cutting using various cutting fluids and limited volume lubrication: a dissertation for the degree master of engineering. Pretoria, Republic of South Africa, 2002 p.
9. Astakhov V.P. Tribology of Metal Cutting. London: Elsevier, 2006. 417 p.
10. Adler D.P., Hii W. W-S., Michalek D. J., Sutherland J. W. Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns // Machining science and technology. Marcel Dekker Inc, 2006. Vol. 10, № 1. P. 23-58.
11. Graham T. Smith. Cutting Tool Technology. Industrial Handbook. Southampton.: Southampton Solent University, 2008. 599 p.
12. Jerry P. Byers. Metalworking Fluids. Second Edition. Boca Raton, FL.: Taylor & Francis Group, 2006. 480 p.
13. Реченко Д.С. Создание твердосплавного инструмента сверх-скоростным шлифованием для суперфинишной лезвийной обработки // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2015. № 2 (140). С. 92–94.
14. Rechenko D. Titov Y., Balova D. Technology high-speed sharpening carbide tools // Machines, technologies, materials. Bulgaria, Sofia, 2015. IX, 12. P. 46–48.
15. Методы оценки охлаждающей способности закалочных сред [Электронный ресурс] / под ред. С.Ю. Шевченко;

Лаборатория проблем закалки кафедры "Материаловедение" МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2007-2008. URL: <http://zakalka.bmstu.ru/zak3.htm>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: 11.06.2015).

16. Шевченко С.Ю. Разработка расчетно-экспериментального метода анализа и контроля охлаждающей способности закалочных сред с использованием датчика градиентного типа: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 170 с.

17. Чередниченко Г.И., Фройштетер Г.Б., Ступак П.М. Физико-химические и теплофизические свойства смазочных материалов. М.: Химия, 1986. 224 с.

18. Ксенофонов А.Г., Шевченко С.Ю. О критериях оценки охлаждающей способности закалочных сред // *Металловедение и термическая обработка металлов*. М., 1998. № 10. С. 18-21.

19. Cakir O., Yardimeden A., Ozben T., Kilickap E. Selection of cutting fluids in machining processes // *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*. 2007. Vol. 25, № 2. P. 99-102.

20. Шнуров Ю.В., Кузнецов И.Г., Кисель А.Г., Реченко Д.С., Ражковский А.А., Попов А.Ю. Устройство для определения охлаждающей способности жидкой среды: пат. № 130081 Рос. Федерация; заявл. 12.02.13; опубл. 10.07.13, Бюл. № 19. 5 с.

References

1. Entelis S.G., Berliner E.M. The lubricant cooling technological means for processing of metals cutting: reference book: *spravochnik*. М.: Mashinostroenie, 1995. 496 p.

2. Khudobin L.V., Babichev A.P., Bulyzhev E.M. 2. The lubricant cooling technological means and their application when processing by cutting: *spravochnik*. М.: Mashinostroenie, 2006. 544 p.

3. Shashin A.D. Influence research SOZH on process of interaction of the tool and preparation when processing metals cutting: dis. ... kand. tekhn. nauk. М., 2003. 118 p.

4. Kiselev E.S. Thermophysics of editing of grinding wheels with application SOZH. Ul'yanovsk: UIGTU, 2001. 171 p.

5. Kuram E., Ozcelik B., Demirbas E., Sik E. Effects of the cutting fluid types and cutting parameters on surface roughness and thrust force // *Proceedings of the World Congress on Engineering*. London, U.K. 2010. Vol. 2. P. 2306-2312.

6. Kuram E. Ozcelik B., Demirbas E. Environmentally friendly machining: Vegetable based cutting fluids // *Green manufacturing processes and systems*. Aveiro, Portugal. 2013. P. 23-48.

7. Mang T., Dresel W. Lubricants and lubrications. Weinheim: Wiley-VCH, 2001. 595 p.

8. Meister B.E. The identification of desirable parameters for aluminium cutting using various cutting fluids and limited volume lubrication: a dissertation for the degree master of engineering. Pretoria, Republic of South Africa, 2002 p.

9. Astakhov V.P. Tribology of Metal Cutting. London: Elsevier, 2006. 417 p.

10. Adler D.P., Hii W. W-S., Michalek D.J., Sutherland J.W. Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns // *Machining science and technology*. Marcel Dekker Inc, 2006. Vol. 10, № 1. P. 23-58.

11. Graham T. Smith. Cutting Tool Technology. Industrial Handbook. Southampton.: Southampton Solent University, 2008. 599 p.

12. Jerry P. Byers. Metalworking Fluids. Second Edition. Boca Raton, FL.: Taylor & Francis Group, 2006. 480 p.

13. Rechenko D.S. Creating a of carbide tools by high-speed sharpening for superfinishing blade processing // *Omsk scientific bulletin. Ser. Equipment, Machines and Technologies*. 2015. № 2 (140). P. 92-94.

14. Rechenko D., Titov Y., Balova D. Technology high-speed sharpening carbide tools // *Machines, technologies, materials*. Bulgaria, Sofia, 2015. IX, 12. P. 46-48.

15. Methods of an assessment of the cooling ability of hardening environments [Elektronnyi resurs] / pod red. S.Yu. Shevchenko; Laboratoriya problem zakalki kafedry "Materialovedenie" MGTU im. N.E. Baumana. М., 2007-2008. URL: <http://zakalka.bmstu.ru/zak3.htm>, svobodnyi. Zagl. s ekrana. Yaz. rus. (data obrashcheniya: 11.06.2015).

16. Shevchenko S.Yu. Development of a settlement and experimental method of the analysis and control of the cooling ability of hardening environments with use of the sensor of gradient type: dis. ... kand. tekhn. nauk. М., 2005. 170 p.

17. Cherednichenko G.I., Froishteter G.B., Stupak P.M. Physical and chemical and heatphysical properties of lubricants. М.: Khimiya, 1986. 224 p.

18. Ksenofonov A.G., Shevchenko S.Yu. About criteria of an assessment of the cooling ability of hardening environments // *Metal Science and Heat*. М., 1998. № 10. P. 18-21.

19. Cakir O., Yardimeden A., Ozben T., Kilickap E. Selection of cutting fluids in machining processes // *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*. 2007. Vol. 25, № 2. P. 99-102.

20. Shnurov Yu.V., Kuznetsov I.G., Kisel' A.G., Rechenko D.S., Razhkovskii A.A., Popov A.Yu. The device for determination of the cooling ability of the liquid environment: pat. № 130081 Ros. Federatsiya; yayavl. 12.02.13; opubl. 10.07.13, Byul. № 19. 5 p.