

Контроль и испытания

Controlling and testing

Научная статья
УДК 621.9.079
DOI: 10.14529/engin250405

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ СМЕСЕЙ В ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ ПРИ МЕХАНООБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В МАССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ю.Б. Алякин¹, kontro73@yandex.ru
Е.М. Булыжев², eugbul1946@gmail.com
В.Г. Шуваев³, shuvaevvacheslav@yandex.ru
А.М. Золотов⁴, a.zolotov@mail.spbstu.ru

¹ Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

² Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

³ Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) являются проверенным технологическим средством обеспечения высокой эффективности операции механообработки. В последнее время в машиностроении успешно продвигаются синтетические и полусинтетические смазочно-охлаждающие жидкости. В ряде случаев находят применение гибридные смазочно-охлаждающие жидкости, представляющие смеси синтетических и полусинтетических смазочно-охлаждающих жидкостей. В данной статье исследуются технологические ситуации механообработки заготовок из алюминиевых сплавов при функционировании гибридных смазочно-охлаждающих жидкостей в условиях массового производства.

Цель проведенных исследований заключалась в выявлении особенностей механообработки заготовок из алюминиевых сплавов в условиях массового производства в среде гибридных высококонцентрированных смазочно-охлаждающих жидкостей в аспекте ресурсосбережения и экологизации.

Методика исследования основывалась на оценке потерь объемов смазочно-охлаждающих жидкостей во времени и рабочем пространстве вложенных систем «смазочно-охлаждающая жидкость – централизованная подсистема сопровождения – технологическая система» и выявления взаимосвязей между технологическими показателями и показателями потерь, т. е. энтропии смазочно-охлаждающих жидкостей.

В результате исследований установлены значения взаимосвязи между конструктивно-технологическими и энтропийными показателями, дана оценка величин энтропийных показателей. Дана характеристика состава потерь смазочно-охлаждающих жидкостей, представляющих связанные между собой распределенные неизбежные потери (энтропия 1-го рода) и одномоментные полные сбросы объемов из централизованных систем (энтропия 2-го рода). Энтропия 1-го рода составляет при обработке заготовок из алюминиевых сплавов 0,67–0,74 от общей энтропии смазочно-охлаждающих жидкостей в данной технологической ситуации. При этом число замен в год варьируется в интервале 0,7–2,0, а срок функционирования составляет 0,5–1,3 года. Такое варьирование вызывает совокупные годовые потери 1300 м³/г.

Дано представление о возможности кардинального снижения энтропии синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей.

© Алякин Ю.Б., Булыжев Е.М., Шуваев В.Г., Золотов А.М., 2025

Ключевые слова: СОЖ, неизбежные распределенные потери, энтропия 1-го рода, одновременные потери, энтропия 2-го рода, ресурс СОЖ

Для цитирования: Исследование эффективности функционирования гибридных смазочно-охлаждающих смесей в централизованных системах при механообработке заготовок из алюминиевых сплавов в массовом производстве / Ю.Б. Алякин, Е.М. Булыжев, В.Г. Шуваев, А.М. Золотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2025. Т. 25, № 4. С. 49–61. DOI: 10.14529/engin250405

Original article
DOI: 10.14529/engin250405

STUDY OF THE OPERATING EFFICIENCY OF HYBRID METALWORKING-FLUID BLENDS IN CENTRALIZED SYSTEMS DURING MACHINING OF ALUMINUM-ALLOY WORKPIECES IN MASS PRODUCTION

Yu.B. Alyakin¹, *kontro73@yandex.ru*
E.M. Bulyzhev², *eugbul1946@gmail.com*
V.G. Shuvaev³, *shuvaevvacheslav@yandex.ru*
A.M. Zolotov⁴, *a.zolotov@mail.spbstu.ru*

¹ Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

² Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

³ Samara State Technical University, Samara, Russia

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Abstract. Metalworking fluids (MWFs) are a proven technological means of ensuring high efficiency in machining operations. In recent years, synthetic and semi-synthetic MWFs have been successfully adopted in mechanical engineering. In some cases, hybrid MWFs—mixtures of synthetic and semi-synthetic fluids—are used. This article examines machining scenarios for aluminum-alloy workpieces when hybrid MWFs are employed under mass-production conditions.

The aim of the study was to identify the features of machining aluminum-alloy workpieces in a medium of hybrid high-concentration MWFs from the standpoint of resource conservation and environmental performance.

The research methodology was based on evaluating time- and workspace-dependent losses of MWF volume within the nested system “MWF – centralized support subsystem – technological system,” and on identifying relationships between technological performance indicators and loss indicators, i.e., the “entropy” of MWFs.

The study established the relationships between design-technological and entropic indicators and provided estimates of the entropic magnitudes. The composition of MWF losses is characterized as interrelated distributed inevitable losses (Type-I entropy) and instantaneous full discharges of volume from centralized systems (Type-II entropy). In machining aluminum-alloy workpieces, Type-I entropy accounts for 0.67–0.74 of the total MWF entropy in the given technological situation. The number of replacements per year varies within 0.7–2.0, and the operating life is 0.5–1.3 years. This variation leads to combined annual losses of about 1,300 m³/yr.

The paper outlines the possibility of a radical reduction in the entropy of synthetic MWFs.

Keywords: coolant, unavoidable distributed losses, entropy of the 1st kind, simultaneous losses, entropy of the 2nd kind, life of the coolant

For citation: Alyakin Yu.B., Bulyzhev E.M., Shuvaev V.G., Zolotov A.M. Study of the operating efficiency of hybrid metalworking-fluid blends in centralized systems during machining of aluminum-alloy workpieces in mass production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2025:25(4):49–61. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin250405

Введение

Смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) является проверенным средством обеспечения высокой технологической эффективности процессов механообработки заготовок деталей, в том числе из алюминиевых сплавов [1–16]. В последнее время успешно применяются синтетические и полусинтетические СОЖ, в том числе их смеси – гибридные СОЖ [17–20], обладающие высокой стойкостью к негативным воздействиям при удовлетворительной технологической эффективности [21].

При анализе причин снижения срока функционирования СОЖ выдвинута гипотеза о том, что первопричиной этого являются её потери в совокупности, состоящие из неизбежных, связанных между собой, распределенных во времени и рабочем пространстве потерь (энтропии 1-го рода) при функционировании и одномоментных объемных потерь при сбросах (энтропия 2-го рода).

Цель проведенных исследований заключалась в подтверждении гипотезы и выявлении первопричин превышения потерь СОЖ и путей их снижения.

Установленные причины снижения срока функционирования синтетических СОЖ:

– неконтролируемые и некомпенсируемые (некорректируемые) в реальном времени ΔT неизбежные распределенные потери при функционировании;

– отсутствие надежного и апробированного инструментария и систем управления процессом функционирования;

– накопление изменений в составе синтетических СОЖ их смесей с полусинтетическими жидкостями, тем более при повышенной концентрации.

На графе (рис. 1) показаны негативные внешние воздействия факторов, влияющих на состав и свойства СОЖ.

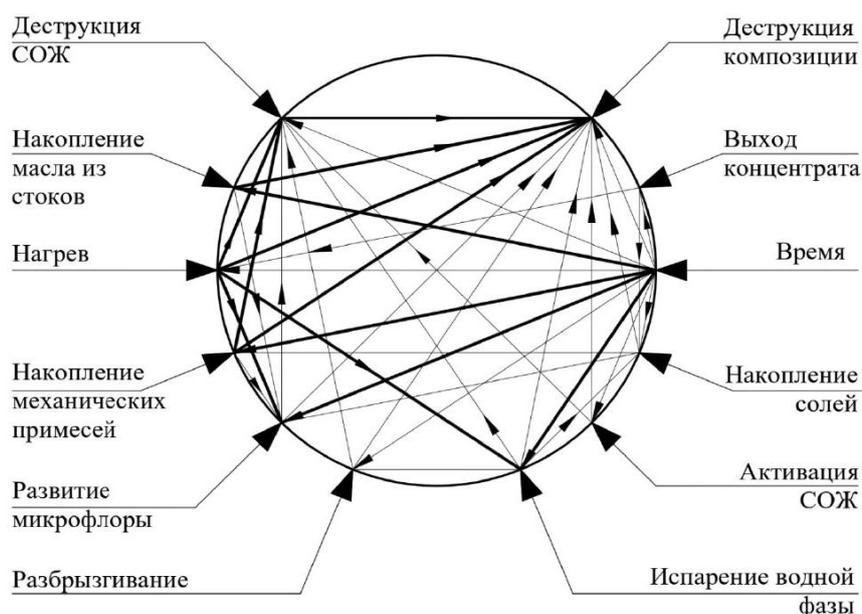


Рис. 1. Граф деградации синтетической СОЖ
Fig. 1. Synthetic degradation graph coolant

Выявленный фактор снижения, по сравнению с регламентируемым сроком функционирования СОЖ, соответствует следующим критериям:

1) фактор может быть воспроизведен при исследовании централизованных систем сопровождения функционирования СОЖ;

2) фактор можно проверить при помощи различных способов;

3) фактор можно использовать в связи с изучением комплекса централизованного сопровождения ЦСФ СОЖ.

На достоверность и обоснованность выявленного факта оказывает прямое влияние:

– характер инвариантной составляющей, проявляющийся в виде 2 групп основных факторов, совместно влияющих на срок функционирования СОЖ между заменами, характеризующими

«стойкость» или способность централизованной системы сопровождения предотвращать негативное воздействие внешних факторов на СОЖ;

- теоретическая (переменная) варианта, выявленная в ходе многолетних наблюдений;
- синергия воздействия 2 групп факторов на СОЖ.

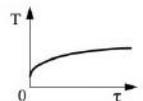
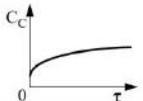
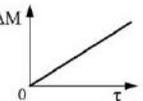
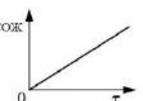
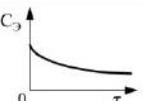
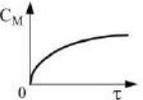
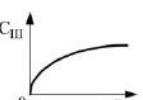
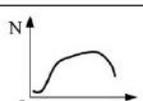
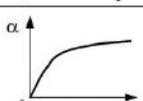
В табл. 1 представлены нежелательные явления происходящие при данных негативных воздействиях.

Карта нежелательных явлений в процессе функционирования синтетической СОЖ

Таблица 1

Map of adverse events during operation of synthetic lubricating coolant

Table 1

№ п/п	Процессы и факторы, ухудшающие функциональные свойства СОЖ	Следствия	Характер изменения параметров процесса *)
1	Теплообмен в зоне механической обработки, сжатие в насосах	Нагрев СОЖ	
2	Испарение водной фазы в зоне механической обработки при разбрызгивании, на открытых поверхностях	Накопление солей жесткости в СОЖ. Потеря объема СОЖ и концентрации	
3	Пиролиз и гидролиз в зоне механической обработки	Деструкция композиции СОЖ	
4	Унос со стружкой и заготовкой, удар и разбрызгивание в зоне резания, утечки, расслоение	Потеря СОЖ	
		Изменение концентрации СОЖ	
5	Потеря ПАВ со стружкой, при разбрызгивании, бипоражение	Деструкция состава СОЖ	
6	Утечки с оборудования, поверхности заготовок	Накопление инородного масла	
7	Смыв стружки из зоны механической обработки	Накопление тонких механических примесей (графита), возникающих при трении, и стружки	
8	Бактериальное поражение	Развитие микрофлоры	
9	Воздействие энергетических полей (магнитного)	Активация СОЖ	
10	Недостаточная эффективность очистки	Накопление тонких фракций механических частиц	

*) Обозначения: τ – время; T – температура; ΔM – изменение массы микроорганизмов; $c_s, c_m, c_{ш}$ – концентрация соответственно эмульсола, инородных масел и шлама в СОЖ; f – частота; \bar{d} – размер частиц шлама; α – поляризуемость молекул СОЖ.

Исследования проводили по методике, основанной на оценке величины потери при функционировании в ЦСФ СОЖ.

Выполнение условий необходимости использования показателей потерь СОЖ для оценки эффективности процесса функционирования СОЖ производили с помощью используемых требований:

- 1) согласие с фактическим материалом, для объяснения которого и было выдвинуто положение о целесообразности применения энтропии и энтропийного подхода [22];
- 2) принципиальная проверяемость адекватности получаемых результатов исследований. Проверка предполагается путем оценки следствий, доступных опытной проверке;
- 3) максимальная общность и прилагаемость к широкому кругу ЦСФ;
- 4) принципиальная простота выдвинутой гипотезы, состоящая в ее способности, исходя из относительно немногих оснований, объяснить широкий круг явлений в комплексе ЦСФ.

Литературный обзор показал отсутствие сведений об использовании нормативно-энтропийного подхода при исследовании эффективности централизованных систем сопровождения функционирования СОЖ, включая синтетические.

При рассмотрении ситуации организации исследований возникает вопрос: отражает ли варьирование объема распределенных неизбежных потерь СОЖ (энтропия 1-го рода) и одномоментные потери СОЖ при заменах (потери 2-го рода) эффективность функционирования СОЖ в аспекте бережливости и экологизации производства?

Объектом исследования был избран комплекс из 4 централизованных систем сопровождения. В соответствии с принципами диалектики выявили следующие обстоятельства:

- а) комплекс существовал и функционирует независимо от наблюдателя на заводе двигателей ПАО «КАМАЗ»;
- б) понимание комплекса во всем многообразии ЦСФ может обеспечить его модернизацию, особенно в аспекте бережливости и экологизации;
- в) исследования нацеливали на системное изучение всех сторон, связей и свойств объекта в рамках системного подхода в условиях существующего производства;
- г) исследования проводили конкретно в определенной ЦСФ, при этом учитывая особенность объекта и специфические условия его существования.

Методика исследований

Методика исследований разрабатывалась с учетом специфики эксплуатации технологических поточных линий в условиях массового производства.

Исследования проводились на объекте, представляющем собой комплекс из 4 централизованных систем сопровождения функционирования СОЖ на поточных линиях обработки заготовок из алюминиевых сплавов, эксплуатируемых на Заводе двигателей ПАО «КАМАЗ».

Исследования производились непосредственно на сооружениях ЦСФ СОЖ комплекса [23] с использованием средств, установленных на емкостях, например, уровнемеры для измерения значений заглубления уровня СиПС СОЖ в паузах процесса её периодической циркуляции на поточных линиях механообработки конкретных заготовок и на всех других этапах эксплуатации жидкости и др.

Описание ЦСФ СОЖ проводили в соответствии с особенностями технологической ситуации (ТС) ЦСФ СиПС СОЖ.

При качественном описании ЦСФ СОЖ упор делали на вид СОЖ, характер обработки, материал заготовки обрабатываемой детали, а также общую характеристику поточной технологической линии, в том числе автоматической. Качественное описание передавало общее знание о комплексе ЦСФ. Количественное описание при исследовании предполагало числовую характеристику свойств, сторон и связей (внешних и внутренних) элементов ЦСФ комплекса. Например, производительность ЦСФ, объем емкостей для СОЖ, число оборотов СОЖ в единицу времени при ее циркуляции $n'_{ц0}$, число коррекций потери объемов и число их замен.

На рис. 2 дана блок-схема алгоритма расчета основных показателей ЦСП, характеризующих ее эксплуатационную эффективность.

Расшифровка показателей, представленных на рис. 2–4:

– Q – производительность ЦСП, м³/ч;

- $n_{ц0}$ – проектное число циклов оборота СОЖ через зону обработки заготовки с учетом поправки при высоте бака $H_B = 300$ см, заполненного в начальный момент времени на 290 см;
- $n'_{ц0}$ – практическое число циклов оборота, 1/ч;
- n'_3 – целочисленная часть величины n_3 , 1/г;
- $V_{зг}$ – годовой объем замен СОЖ, м³/г;
- $V_{сг}$ – годовой объем сбрасываемой отработанной СОЖ, м³/г;
- $V_{птг}$ – годовой объем распределенных неизбежных потерь СОЖ, м³/г;
- $V_{др}$ – годовой объем репродукции (добавок) СиПС СОЖ при коррекции и замене, м³/г;
- $V_{пт}$ – годовой объем приготовления СОЖ, м³/г;
- ΔV_i и $\Delta V_{гcp}$ – потеря СОЖ в i -м цикле коррекции в период между смежными моментами коррекции и средняя по году эксплуатационная потеря СОЖ, м³;
- ΔT_i – период времени 1-го цикла коррекции и средний по году период времени коррекции, ч;
- v_i и $\bar{v}_г$ – скорость потери СОЖ в i -м цикле коррекции и средняя по году скорость потерь СОЖ, м³/ч;
- число циклов коррекции за год, 1/г.

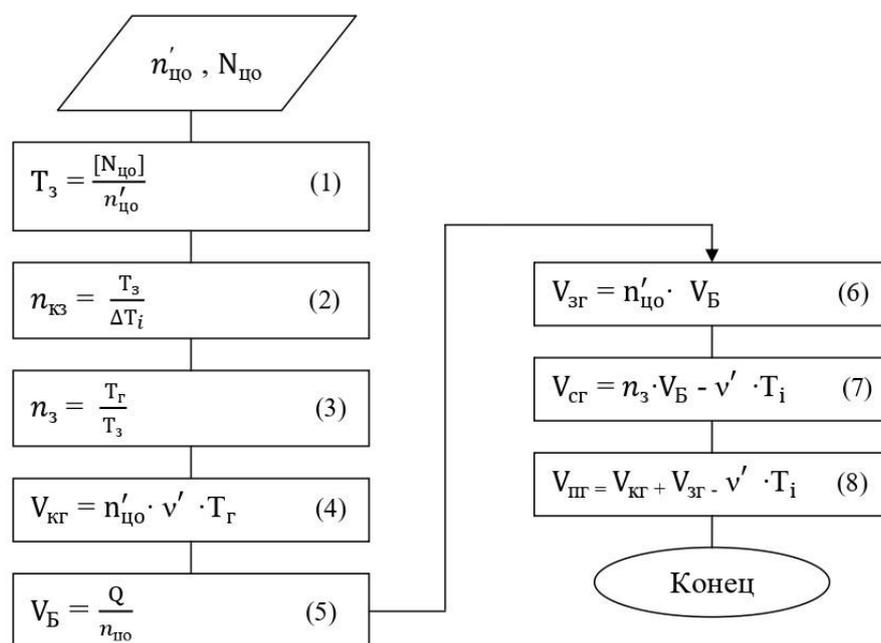


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения конструктивно-технологических показателей ЦСП
Fig. 2. Block diagram of the algorithm for determining design and technological indicators CSP

Потери объема СОЖ ΔV_2 приняты в качестве базы для расчета значения скорости энтропии v_i :

$$v_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta T_i}; v_{i\phi} = \Sigma \Delta V_i / \Sigma \Delta T_i.$$

В дальнейшем $v_{i\phi}$ будет принято в качестве индикативного критерия энтропии.

На рис. 3а показана расчетная схема заглужения уровня СОЖ в емкости вследствие потерь при циркуляции (обороте) жидкости в ЦСП и зоне обработки.

Обозначения уровней заглужения, см:

- H_0 – верхний край емкости – точка отсчета заглужения уровня, см;
- H_1 – уровень заполнения емкости, см;
- H_2 – уровень находящейся в ёмкости СОЖ после суммарной её потери за период безкорректной (безкомпенсационной) ее эксплуатации, см;
- $H_{3м}$ – уровень СОЖ, возникающий вследствие заполнения ею трубопроводов, станков технологической линии, лотков стока до возврата в емкость ЦСП, см;
- $H_{зк}$ – уровень заглужения СОЖ в емкости перед коррекцией объема, см;
- H_5 – уровень заглужения СОЖ, обеспечивающий предотвращение попадания воздуха в насос во избежание кавитации, см;

– H_6 – заглубление дна емкости, см;
 – ΔH_2 – перепады заглублений, возникающие вследствие потерь СОЖ за безкоррекционный период ее эксплуатации, см;
 – ΔH_5 – перепад заглубления уровня, позволяющий избежать засасывания насосом воздуха, см;
 – ΔH_{Π} – перепад заглубления уровня, возникающий вследствие заполнения инфраструктуры ЦСП циркулирующей жидкостью:

$$H_{3H} = H_0 - H_1 - \Delta H_{\Pi}; H_{3K} = H_0 - H_1 - \Delta H_2 - \Delta H_3.$$

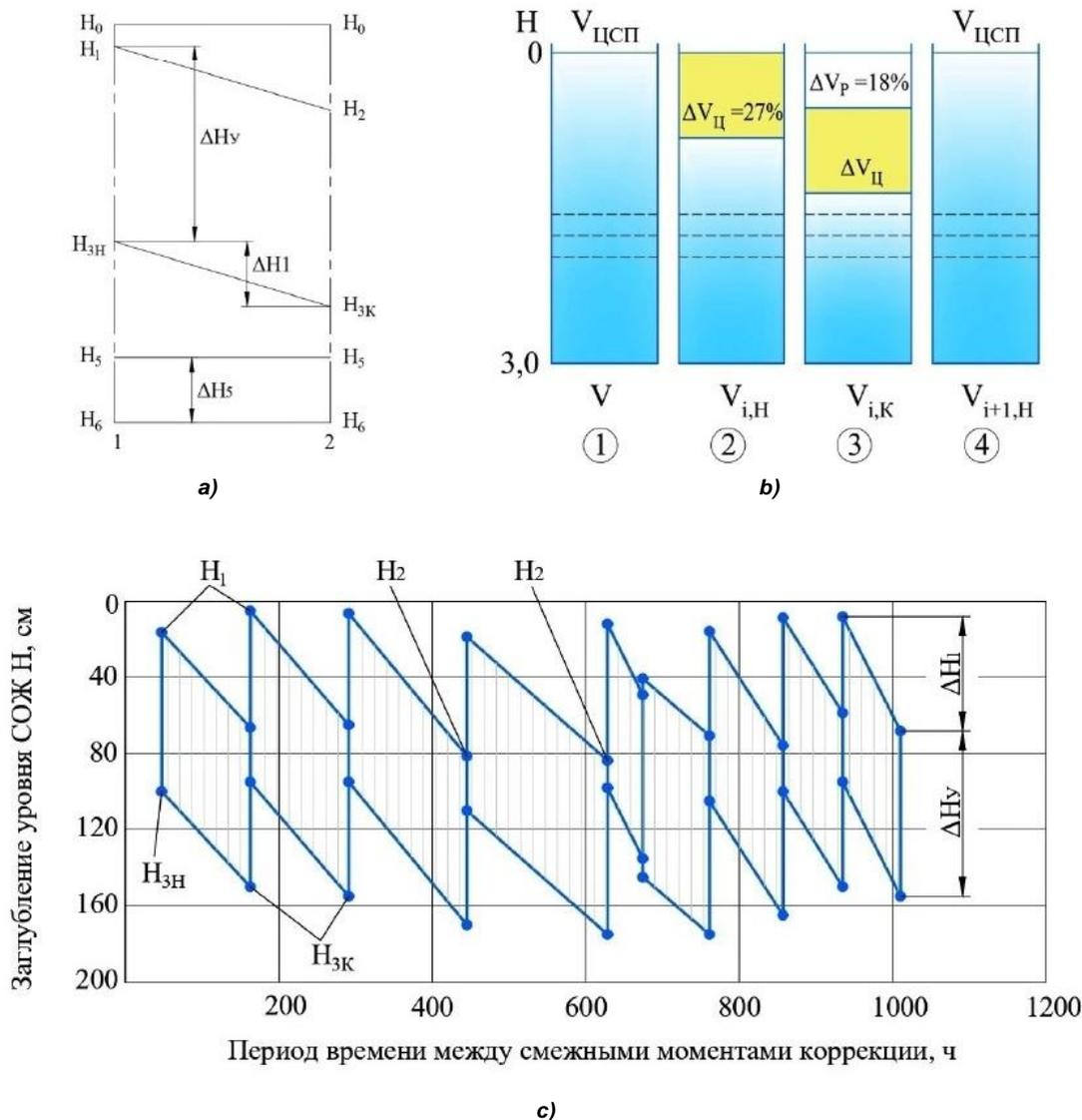


Рис. 3. Схема изменения заглубления уровней и объемов СиПС СОЖ в емкости ЦСФ комплекса: а – расчетная схема; б – схема состояний СиПС СОЖ в емкости ЦСФ в процессе функционирования в момент (замены) «1» и «4», при первоначальной подаче СОЖ в ЦСФ «2» и в конечный момент перед коррекцией объема «3»; в – временной ряд изменений заглубления уровней

Fig. 3. Scheme of change in depth of levels and volumes of the coolant SiPS in the tank of the CSF complex: а – calculation scheme; б – scheme of states of the coolant SiPS in the tank of the CSF during operation at the moment (replacement) “1” and “4”, at the initial supply of coolant to the CSF “2” and at the final moment before volume correction “3”; в – time series of changes in depth of levels

Результаты исследований

В табл. 2 показаны результаты наблюдений, выполненных при обработке заготовок из алюминиевых сплавов. Наблюдались процессы, происходящие в ЦСФ 24, ЦСФ 76, ЦСФ 25 и ЦСФ 23.

Таблица 2
Технологические ситуации комплекса централизованных систем сопровождения функционирования СИПС СОЖ при лезвийной обработке заготовок из алюминиевых сплавов

Table 2
Technological situations of the complex of centralized systems for supporting the functioning of the C&PS coolant during blade processing of workpieces made of aluminum alloys

Показатель	ЦСФ			
	23	24	25	76
$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	720	180	1080	720
$V_3, \text{ м}^3$	130	34	165	130
$n'_{\text{цо}}, 1/\text{ч}$	6,02	5,6	7,0	5,8
$\alpha_{\text{ср}}, \%$	8,6	11,5	8,3	10,6
$v, \text{ м}^3/\text{ч}$	0,132	64,4	58,1	61,5

Ранжирование результатов производилось по величине n_3 , характеризующей энтропию 2-го рода. Доля энтропии 1-го порядка в совокупной энтропии варьировалась в интервале 0,51–0,73. При этом средняя скорость энтропии изменялась в интервале 0,017–0,082 м³/ч.

На рис. 4а показана зависимость $V_{31}(Q)$, носящая линейный характер, т. е. $\delta\bar{V} = \frac{\bar{V}_{31}}{Q} = \text{const}$. Таким образом, при обработке заготовок из алюминиевых сплавов подтверждается предположение о правомерности применения принципа неопределенности, когда

$$\bar{v} = \Delta\bar{V}_{31} \frac{1}{\Delta T} \cong \text{const}. \quad (1)$$

В соответствии с этим V_3/Q также имеет линейный вид (рис. 4б) и прослеживается зависимость $n'_{\text{цо}}(Q)$, имеющая линейный вид (рис. 4в). Однако линейность энтропии концентрата в связи с варьированием средней концентрации СОЖ в области высоких значений Q отклоняется в сторону снижения (рис. 4г).

Данная информация полезна при проектировании централизованных систем сопровождения функционирования СОЖ, при задании исходных конструктивно-технологических показателей, таких как $n_{\text{цо}}$, V_{31} и V_3 в зависимости от Q .

На рис. 5 показаны диаграммы энтропийных показателей процесса обработки заготовок из алюминиевых сплавов.

На рис. 5а прослеживается для ЦСФ23-ЦСФ25 соответствие изменения скорости энтропии 1-го рода, варьированию энтропии 2-го рода, характеризуемой показателем – число замен n_3 . Это объясняется тем, что в данной группе технологических ситуаций прослеживается прямая связь между энтропией и 1-го и 2-го рода.

На рис. 5в–5д показаны диаграммы годовой энтропии 1-го и 2-го рода V_{31} , V_{32} и совокупной энтропии $V_{3г}$ ЦСФ24.

При соответствующей невысокой производительности обусловлено наименьшие значения V_{32} и $V_{3г}$. В связи с $n_3 = 2$ для ЦСФ76 величина доли энтропии 2-го рода увеличивается с 0,27–0,28 до 0,49.

В этом случае мы имеем $V_{32} = 110 \text{ м}^3$ при $V_{3г} = 318 \text{ м}^3$ или примерно треть от $V_{3г}$.

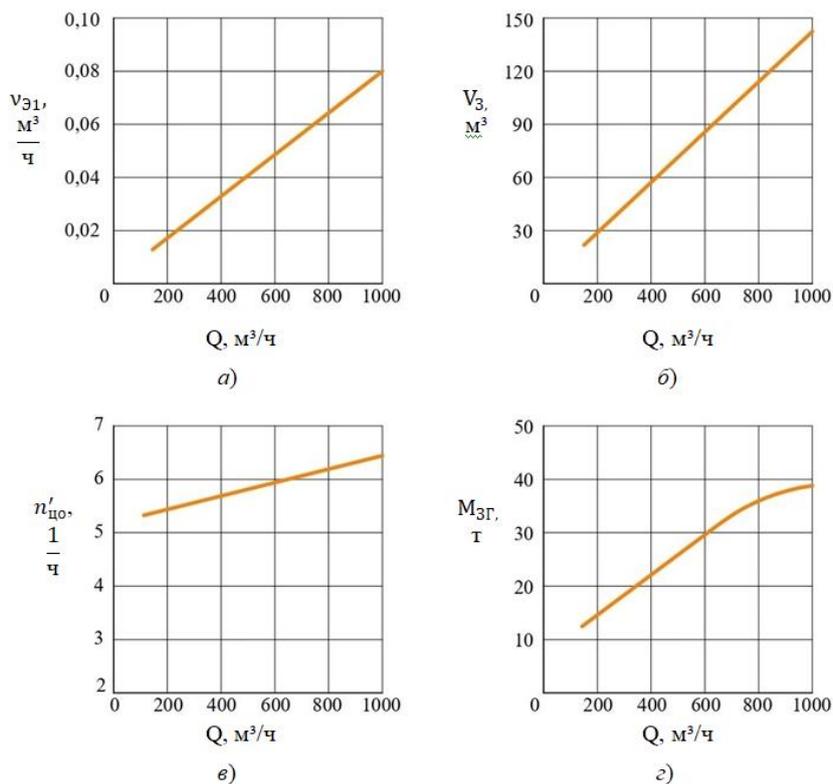


Рис. 4. Зависимость $v_{Э1}$, V_3 , $n'_{ц0}$ и $M_{ЭГ}$ от Q
Fig. 4. The dependence $v_{Э1}$, V_3 , $n'_{ц0}$ and $M_{ЭГ}$ on Q

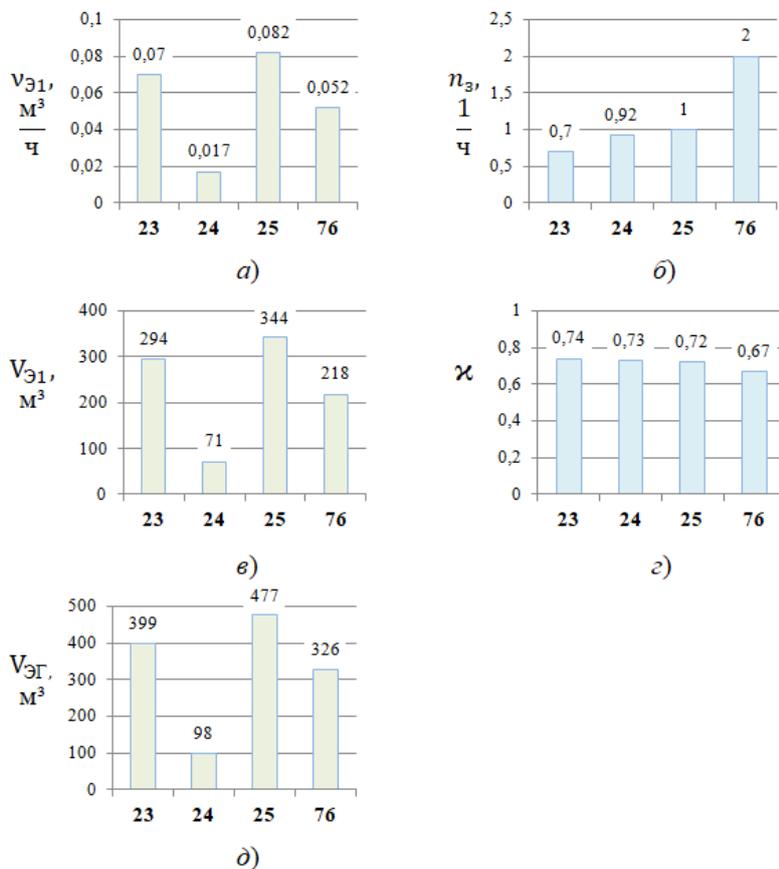


Рис. 5. Диаграммы $v_{Э1}$, n_3 , $V_{Э1}$; κ ; $V_{ЭГ}$ по ЦСФ
Fig. 5. Diagrams $v_{Э1}$, n_3 , $V_{Э1}$; κ ; $V_{ЭГ}$ by CSF

Выводы

1. Процесс механообработки заготовок из алюминиевых сплавов в условиях массового производства успешно осуществляется при функционировании смеси синтетических и полусинтетических смазочно-охлаждающих жидкостей в централизованных системах сопровождения.

2. Основные конструктивно-технологические показатели наблюдаемых технологических ситуаций: производительность – 180–1080 м³/ч; объем заполнения емкостей системы составляла 29–141 м³; в системах обеспечивается шестикратный средний часовой оборот СОЖ, концентрация гибридных СОЖ составляла 8,3–11,5 %, что в 2,7–3,8 раза превысило концентрацию водоземulsionных СОЖ; в период между коррекциями СОЖ ($\Delta T = 59\text{--}121$ ч) потеря объема составила 2,1–9,0 м³, потеря СОЖ при залповом сбросе в момент замены составляла 27–213 м³ при средней величине 120 м³.

3. Потери СОЖ рассматривались с позиций детерминировано-вероятностного и нормативно-энтропийного подходов, неизбежные распределенные потери характеризовались как энтропия 1-го рода, а одномоментные потери СОЖ на разложение в момент её замены – как энтропия 2-го рода. Относительное по производительности среднее значение скорости энтропии 1-го рода $0,076 \cdot 10^{-3}$. Погрешность средней скорости энтропии не превысила 16,7 %.

4. Между скоростью потерь 1-го и энтропией 2-го рода наблюдалась косвенная связь, что указывало на наличие субъективного фактора, с одной стороны, и варьирование качества гибридной СОЖ, с другой стороны.

5. Энтропия 1-го рода наследует распределение скорости энтропии, отнесенной к Q. Энтропия 2-го рода варьируется для ЦСФ23 – ЦСФ25 в относительно нешироком интервале $0,122\text{--}0,150 \cdot 10^{-3}$. Потери 1-го рода, отнесенные к Q, составляют $0,08\text{--}0,25 \cdot 10^{-3}$ и в 2 раза больше по сравнению с энтропией 2-го рода, равной $0,04\text{--}0,122 \cdot 10^{-3}$.

6. Совокупные потери (энтропия) гибридных СОЖ могут быть уменьшены для ЦСФ76 в 2 раза при исключении субъективности при принятии решения о замене жидкости, что возможно на основе наблюдаемого значения $n_3 = 1,0$ для ЦСФ25.

Список литературы

1. Бабаев Э.Р. Смазочно-охлаждающие жидкости: свойства и методы применения // Башкирский химический журнал. 2022. Т. 29, № 3. С. 11–19. DOI: 10.17122/bcj-2022-3-11-19. EDN: OVBRYV.

2. Ларина А.И., Постникова И.В. Механизмы действия смазочно-охлаждающих жидкостей // Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. 2022. № 3(71). С. 59–66. DOI: 10.6060/snt.20227103.0007. EDN: HFTFFX.

3. Кисель А.Г., Макашин Д.С. Влияние СОЖ и режимов обработки на шероховатость поверхности при торцевом фрезеровании заготовок из алюминиевых сплавов // Омский научный вестник. 2022. № 3(183). С. 32–36. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-32-36. EDN: IDVVVK.

4. Репин Д.С., Наумов А.Г. Об эффективности активации полимерсодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке металлов резанием // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2020. Т. 24, № 2(88). С. 36–42. EDN: ZBITXG.

5. Орлов Ю.А., Лазарев В.М., Беляев Л.В. Перспективы внедрения новых составов СОЖ в условиях импортозамещения // Инновационное развитие образования, науки и технологий: сб. науч. тр. по материалам II Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 31 августа 2022 года. М.: ИП Туголуков Александр Валерьевич, 2022. С. 162–165. EDN: HWAHLL.

6. Alaba E.S., Kazeem R.A., Adebayo A.S. et al. Evaluation of palm kernel oil as cutting lubricant in turning AISI 1039 steel using Taguchi-grey relational analysis optimization technique // Advances in Industrial and Manufacturing Engineering. 2023. Vol. 6. URL: DOI: 10.1016/j.aime.2023.100115 (дата обращения: 15.06.2023).

7. Amini S., Khakbaz H., Barani A. Improvement of Near-Dry Machining and Its Effect on Tool Wear in Turning of AISI 4142 // Materials and Manufacturing Processes. 2015. Vol. 30. P. 241–247.

8. Astakhov V.P. Ecological Machining: Near-dry Machining // Machining / ed. by S. London. 2008. P. 195–223. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84800-213-5_7 (дата обращения: 13.07.2022).

9. Ba S., Sa N., Chakradharb D. Effect of working parameters on the surface integrity in cryogenic diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel with a novel diamond burnishing tool // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 38. P. 564–571.

10. Ba S., Sa N., Chakradharb D. Sustainable diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel for enhanced surface integrity and product performance by using a novel modified tool // *Materials Research Express*. 2019. No. 6. P. 14.

11. Baldin V., Ribeiro da Silva L. R., Gelamo R.V. et al. Influence of Graphene Nanosheets on Thermo-Physical and Tribological Properties of Sustainable Cutting Fluids for MQL Application in Machining Processes // *Research Square*. 2021. URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-838748/v1> (дата обращения: 13.06.2023).

12. Bhuyan M., Sarmah A., Gajrani K.K. et al. State of Art on Minimum Quantity Lubrication in Grinding Process // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, no. 9. P. 19638–19647.

13. Boswell B., Islam M.N., Davies I.J. et al. A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining // *Curtin University*. 2022. URL: <https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/58446/256981.pdf?sequence=2> (дата обращения: 22.04.2022).

14. Cetin M.H., Ozcelik B., Kuram E., Demirbas E. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method // *Journal of Cleaner Production*. 2011. Vol. 19, no. 17–18. P. 2049–2056. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.07.013.

15. Challen J.M., McLean L.J., Oxley P.L.B. Plastic deformation of a metal surface in sliding contact with a hard wedge: its relation to friction and wear // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 1984. P. 161–181.

16. Cui X., Li C., Ding W. et al. Minimum quantity lubrication machining of aeronautical materials using carbon group nanolubricant: From mechanisms to application // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. Vol. 35. P. 85–112.

17. Пыдрин А.В., Пикина А.М., Наджи Н.А. Ф., Голубев М.И. Влияние состава смазывающе-охлаждающей жидкости на шероховатость и коррозионную стойкость поверхности деталей после механической обработки // *Техника и оборудование для села*. 2020. № 10(280). С. 28–31. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-10-28-31. EDN: HBNBNP.

18. Бобровский Н.М., Шенбергер П.Н., Каменов Р.У. [и др.]. Тепловая модель виртуальных испытаний технологии поверхностной пластической деформации // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2024. № 11. С. 38–44. DOI: 10.71033/0234-8241.2024.66.50.002. EDN: SBJUVX.

19. Savel'ev A.V., Bobrovskii N.M. Dry Machining of Machine Parts: Surface Plastic Deformation // *Russian Engineering Research*. 2024. Vol. 44, no. 2. P. 250–253. DOI: 10.3103/S1068798X24020230. EDN: ZHEKGC.

20. Мельников П.А., Васильев А.В., Соболев А.А., Гусарова Д.В. Снижение риска негативно-го воздействия смазочно-охлаждающих технологических средств в условиях предприятий машиностроения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13, № 6. С. 233–239.

References

1. Babayev E.R. [Cutting Fluids: Properties and Methods of Use]. *Bashkir Chemical Journal*, 2022, vol. 29(3), pp. 11–19. DOI: 10.17122/bcj-2022-3-11-19. (In Russ.)

2. Larina A.I., Postnikova I.V. Mechanisms of Action of Coolants. *Modern High Technologies Regional Edition*, 2022, vol. 71, pp. 59–66. DOI: 10.6060/snt.20227103.0007. (In Russ.)

3. Kisel' A.G., Makashin D.S. Influence of Cutting Fluids and Processing Conditions on Surface Roughness During Face Milling of Aluminum Alloy Blanks. *Omsk Scientific Bulletin*, 2022, no. 3(183), pp. 32–36. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-32-36. (In Russ.)

4. Repin D.S., Naumov A.G. On the Effectiveness of Activation of Polymer-Containing Cutting Media in Metal Cutting. *Vestnik Ufa State Aviation Technical University*, 2020, vol. 24, no. (2)(88), pp. 36–42. (In Russ.)

5. Orlov Yu.A., Lazarev V.M., Belyaev L.V. Perspektivy vnedreniya novykh sostavov SOZh v usloviyakh importozamesheniya [Prospects for Introducing New Compositions of Cutting Fluids under Import Substitution Conditions]. *Collection of scientific papers from the International Conference "Innovative Development of Education, Science and Technology"*, Moscow, August 31, 2022. Moscow, 2022, pp. 162–165.
6. Alaba E.S., Kazeem R.A., Adebayo A.S. et al. Evaluation of Palm Kernel Oil as Cutting Lubricant in Turning AISI 1039 Steel Using Taguchi-Gray Relational Analysis Optimization Technique. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2023 vol. 6, no. 100115. DOI: 10.1016/j.aime.2023.100115.
7. Amini S., Khakbaz H., Barani A. Improvement of Near-Dry Machining and Its Effect on Tool Wear in Turning of AISI 4142. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015. vol. 30, pp. 241–247.
8. Astakhov V.P. Ecological Machining: Near-Dry Machining, Chapter 7 in *Machining*. Ed. by S. London. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, pp. 195–223. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5_7.
9. Ba S., Sa N., Chakradharb D. Effect of Working Parameters on the Surface Integrity in Cryogenic Diamond Burnishing of 17-4PH Stainless Steel with a Novel Diamond Burnishing Tool. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 38, pp. 564–571.
10. Ba S., Sa N., Chakradharb D. Sustainable Diamond Burnishing of 17-4PH Stainless Steel for Enhanced Surface Integrity and Product Performance by Using a Novel Modified Tool. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6, art. no. 14.
11. Baldin V., Ribeiro da Silva L.R., Gelamo R.V., et al. Influence of Graphene Nanosheets on Thermophysical and Tribological Properties of Sustainable Cutting Fluids for MQL Application in Machining Processes. *Research Square*, 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-838748/v1.
12. Bhuyan M., Sarmah A., Gajrani K.K., et al. State of Art on Minimum Quantity Lubrication in Grinding Process. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, issue 9, pp. 19638–19647.
13. Boswell B., Islam M.N., Davies I.J. et al. A Review Identifying the Effectiveness of Minimum Quantity Lubrication (MQL) During Conventional Machining. *Curtin University*, 2022. URL: <https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/58446/256981.pdf?sequence=2> (date of accesses 22.04.2022).
14. Çetin M.H., Özçelik B., Kuram E., Demirbaş E. Evaluation of Vegetable-Based Cutting Fluids with Extreme Pressure and Cutting Parameters in Turning of AISI 304L by Taguchi Method. *Journal of Cleaner Production*, 2011, vol. 19, issues 17–18, pp. 2049–2056. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.07.013.
15. Challen J.M., McLean L.J., Oxley P.L.B. Plastic Deformation of a Metal Surface in Sliding Contact with a Hard Wedge: Its Relation to Friction and Wear. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 1984, pp. 161–181.
16. Cui X., Li C., Ding W., et al. Minimum Quantity Lubrication Machining of Aeronautical Materials Using Carbon Group Nanolubricant: From Mechanisms to Application. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, vol. 35, pp. 85–112.
17. Pydrin A.V., Pikina A.M., Nadji N.A.F., Golubev M.I. The Impact of Cutting Fluid Composition on Surface Roughness and Corrosion Resistance after Mechanical Treatment. *Agricultural Equipment and Tools*, 2020, no. 10(280), pp. 28–31. (In Russ.) DOI: 10.33267/2072-9642-2020-10-28-31.
18. Bobrovsky N.M., Shenberger P.N., Kamenov R.U. et al. Thermal Model of Virtual Testing of Surface Plastic Deformation Technology. *Forging & Stamping Production, Material Forming*, 2024, **66**(50): 38–44 (2024). (In Russ.) DOI: 10.71033/0234-8241.2024.66.50.002.
19. Savelyev A.V., Bobrovskiy N.M. Dry Machining of Machine Parts: Surface Plastic Deformation. *Russian Engineering Research*, vol. 44, no. 2, pp. 250–253 (2024). DOI: 10.3103/S1068798X24020230.
20. Melnikov P.A., Vasilyev A.V., Sobolev A.A., Gusarova D.V. Reduction of Negative Effects of Cutting Fluids in Machine-Building Enterprises. *Izvestia Samara Scientific Centre of Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13(6), pp. 233–239. (In Russ.)

Информация об авторах

Алякин Юрий Борисович, аспирант кафедры физического материаловедения, Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия; kontro73@yandex.ru

Бульжев Евгений Михайлович, доцент, доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии в машиностроении», Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия; eugbul1946@gmail.com

Шуваев Вячеслав Георгиевич, доцент, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты», Самарский государственный технический университет, Самара, Россия; shuvaevvacheslav@yandex.ru

Золотов Александр Максимович, профессор, доктор технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Технология и исследование материалов», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия; a_zolotov@mail.spbstu.ru

Information about the authors

Yuri B. Alyakin, PhD student, Department of Physical Materials Science, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia; kontro73@yandex.ru

Evgeny M. Bulyzhev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of “Innovative Technologies in Mechanical Engineering, Ulyanovsk State Technical University; Ulyanovsk, Russia; eugbul1946@gmail.com

Vyacheslav G. Shuvaev, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of “Manufacturing Technology, Machine Tools and Instruments”, Samara State Technical University, Samara, Russia; shuvaevvacheslav@yandex.ru

Alexander M. Zolotov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Department of “Technology and Materials Research,” Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; *St. Petersburg, Russia*; a_zolotov@mail.spbstu.ru

Статья поступила в редакцию 11.09.2025; принята к публикации 17.09.2025.

The article was submitted 11.09.2025; accepted for publication 17.09.2025