

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 577.3:57.086.8

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/01>**Хміль Н.В.**

Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова Національної академії наук України

Колесніков В.Г.

Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова Національної академії наук України

Хміль С.І.

Харківський підшипниковий завод «ХАРП»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ РІДИН В МЕТАЛООБРОБНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті розглядається питання контролю реальної частини комплексної діелектричної проникності (ϵ') та динамічного поверхневого натягу (σ) напівсинтетичної мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) в умовах металообробної промисловості на етапах відновлення змащувальних властивостей за рахунок екзогенних та ендогенних метаболітів мікрофлори МОР. Стверджується, що мікрохвильова діелектрометрія області γ -дисперсії діелектричної проникності вільної води (частота генерації діода Гана 37,7 ГГц) при одночасному sweer-режимі частот акустичного діапазону 20...25000 Гц є інструментом контролю якісних показників металообробних емульсій. Основним елементом експериментального комплексу є хвилевідна лінія Р1-39 (8-мм діапазон), атенюатор, п'єзоплатформа, вимірювальна п'єзокювета, ресструючий комплекс. Фіксована частота генерації міліметрового випромінювання забезпечила прецизійну оцінку зміни гідратації позаклітинних та внутрішньоклітинних метаболітів мікрофлори МОР (за інтегральною зміною кількості вільної та зв'язаної води металообробної емульсії). Проводилися спектрофотометричні вимірювання: спектри поглинання екзо- та ендометаболітів системи «МОР-мікрофлора» аналізували на довжинах хвиль ультрафіолетового та видимого діапазонів. Показано збільшення відносної кількості вільної води при розведенні відпрацьованої МОР свіжоотриманою МОР з коефіцієнтом розведення (DF – dilution factor) $DF=10$ та $DF=8$, при цьому $\Delta\epsilon' = 0,016 \times 10^{-10}$ Ф/м та $\Delta\epsilon' = 0,063 \times 10^{-10}$ Ф/м, відповідно. За цих умов параметр σ наближався до значення поверхневого натягу контрольних зразків, можливо за рахунок органічних метаболітів контамінуючої мікрофлори, що підтверджується даними спектрального аналізу у видимій області довжин хвиль.

Застосування системи контролю діелектричної проникності та динамічного поверхневого натягу МОР на виробництві забезпечить регулювання оптимальної концентрації мікрофлори для безперебійного циклу подачі емульсії з оптимальними змащувальними характеристиками в процесі виробництва деталей. Отримані експериментальні дані показали доцільність впровадження системи контролю в технологію інтенсивного та економічно вигідного відновлення змащувальних та охолоджувальних властивостей металообробних емульсій у масштабах виробництва.

Ключові слова: мікрохвильова діелектрометрія, мастильно-охолоджувальні рідини, ревіталізація, мікрофлора, діелектрична проникність, динамічний поверхневий натяг.

Постановка проблеми. Економічні та екологічні проблеми сьогодення спонукають до раціонального використання дороговартісних ресурсів на виробництві, в тому числі мастильно-охолоджувальних рідин (МОР). Світові виробники пропонують різноманітні МОР на органічній і синтетичній

основі – Adrana, Cimpro, Sky. Ці емульсії забезпечують належну якість обробки металів на етапах токарної обробки та шліфування виробів [1, с. 74], але в той же час мають певні терміни використання: як правило, більшу вартість мають МОР з більшим пролонгованим часом використання. В собівар-

тості продукції українських металообробних підприємств значну частину (до 30 відсотків) займає вартість МОР. Тому однією з нагальних задач металообробних підприємств є оптимізація параметрів «вартість-термін використання» МОР, які пропонуються світовими виробниками МОР, таких брендів як «Shell», «Mobil» та ін. Провідні виробники МОР рекомендують повну заміну діючої речовини в системах забезпечення робочого циклу обробки металів від 1-го місяця (МОР на органічній основі) до 1-го року (МОР на синтетичній та напівсинтетичній основах). Тому на сьогодні актуальним є питання подовження експлуатаційних властивостей МОР в умовах діючого виробництва в Україні тим паче, якщо виробництво періодично простоє через надзвичайні обставини – воєнні дії та пандемію Covid-19. Одним із факторів забруднення МОР є контамінація мікрофлорою – бактеріями, мікрободоростями, цвілевими грибами, що приводить до неякісної обробки деталей та масштабної відбраковки. Знезараження МОР проводять із застосуванням біоцидів та антибіотиків, що не завжди доречно, так як провокує забруднення навколишнього середовища та викликає захворювання алергічного генезу у заводського персоналу [2, с. 4; 3, с. 11]. Фізичні методи відновлення хіміко-технічних властивостей МОР – лазерне випромінювання, ультразвук, ультрафіолет на сьогодні реалізуються лише в умовах експериментально-дослідного виробництва та потребують технічної модернізації [4, с. 168].

Сучасні трибологічні дослідження спрямовані на розвиток нової концепції ревіталізації МОР, в основі якої лежать біохімічні властивості екзогенних та ендогенних метаболітів, що продукуються мікрофлорою МОР у процесі її життєдіяльності [5, с. 360]. При цьому надійний контроль фізико-хімічних та біологічних властивостей МОР повинен забезпечуватися набором інструментів та критеріїв, що дозволяють об'єктивно та швидко реєструвати зміни у системі «МОР-мікрофлора» протягом робочого циклу та вчасно корегувати їх.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні концепція створення регенеративної системи МОР на мікробіологічній основі підтверджується теоретичними та експериментальними дослідженнями біологічних властивостей метаболітів мікрофлори. Насамперед, це актуально з економічної точки зору, оскільки природні жирні кислоти, сполуки сірки є аналогами для заміни компонентів мінеральних масел, що входять до складу МОР. Ці дослідження сприяють розвитку оригінального напрямку ревіталізації МОР, в основі якого є здат-

ність мікрофлори утворювати біоплівки на поверхні оброблюваних деталей за рахунок метаболітів – екзополісахаридів або ендогенних внутрішньоклітинних ліпідних включень, яким притаманна, за певних умов, змащувальна властивість [6, с. 152].

На даний час Європейською комісією стандарту якості поки що не розроблені чіткі рекомендації щодо використання мікрофлори в якості відновлювальної та стабілізуючої ланки, тому дослідження залишаються на рівні лабораторних експериментально-виробничих ліній. В роботі [5, с. 359] представлено експериментальний матеріал стосовно покращення змащувальних властивостей МОР за рахунок екзо- та ендометаболітів мікроорганізмів із застосуванням триботестера Брюггера. Трибологічні випробування показали залежність показника теста Брюггера від концентрації мікрофлори: емульсія з концентрацією мікрофлори $\geq 10^8$ клітин/мл характеризувалася вищим показником теста Брюггера ~ 50 Н/мм². Крім того, температурний фактор, чистота культури мікрофлори, алгоритм додавання спеціальних речовин в дослідне середовище вплинули на успішність підвищення змащувальної здатності між металообробним середовищем і деталями та інструментом, які оброблюються. У цих трибологічних дослідженнях залишаються відкритими питання, пов'язані з механізмами, що забезпечують змащувальну здатність емульсій, а також додатковими критеріями, що дозволяють регулювати участь біологічної клітинної системи для забезпечення регламентованих до ДСТУ властивостей емульсій.

Постановка завдання. Метою роботи є експериментальне дослідження діелектричної проникності та динамічного поверхневого натягу МОР в присутності екзогенних та ендогенних метаболітів мікрофлори МОР для відновлення змащувальної та охолоджувальної здатності напівсинтетичної металообробної рідини.

Виклад основного матеріалу дослідження. Мікрохвильова діелектрометрія в комплексі зі *sweep*-режимом акустичного діапазону [7, с. 40] є прецизійним та доступним методом вимірювання параметрів діелектричної проникності та динамічного поверхневого натягу рідин. Поряд з резонансними методами [8, с. 403], спектроскопією та квазіоптичними вимірюваннями в терагерцовому діапазоні електромагнітного спектру [9, с. 99], мікрохвильова діелектрометрія на частотах γ -дисперсії діелектричної проникності вільної води має можливість аналізувати діелектричну проникність МОР, а також

конформаційні зміни білкових, глікопротеїнових та гліколіпідних макромолекул мікрофлори МОР, якою вона контамінується у процесі експлуатації [10, с. 1762]. За допомогою цього методу були отримані показники ϵ' та σ свіжоотриманих МОР на різній основі та МОР різних строків експлуатації [7, с. 40; 10, с. 1764], а також запропоновані підходи відновлення властивостей МОР шляхом застосування терагерцевого лазера [4, с. 168] та барботування [11, с. 37]. При цьому наявність генераторної та хвилевідної бази міліметрового та субміліметрового діапазонів українського виробництва сприяли технічній реалізації вимірювань на досить високому рівні з мінімальними часовими витратами та незначною трудомісткістю.

В експерименті досліджувалась напівсинтетична водорозчинна МОР, яка використовується у великомасштабних безперервних процесах змащування та охолодження металу при виготовленні шарикових та роликів підшипників. Концентрація МОР розводили водою до концентрації робочого розчину 5,0–7,0%. Хіміко-технічні характеристики свіжоотриманої МОР та відпрацьованої МОР представлені в таблиці 1.

В експерименті був використаний апаратурно-реєструючий комплекс на базі хвилевідної НВЧ-діелектрометрії міліметрового діапазону радіохвиль; фіксована частота генерації міліметрових хвиль ($f=37,7$ ГГц) забезпечувалася діодом Гана. На виході 8-мм хвилевіду розміщувалася вимірювальна п'єзокувета, яка у *sweep*-режимі модулювалася частотами акустичного діапазону ($f=20\dots25000$ Гц). Методика вимірювання дозволила одночасно реєструвати зміну параметрів ϵ' та σ відносно контрольних зразків та докладно описана в роботі [11, с. 36]. Відносна похибка визначення ϵ' склала $\pm 0,7\%$, абсолютна похибка визначення ϵ' склала $\pm 1,73 \times 10^{-12}$ Ф/м.

Оцінка біологічного зараження напівсинтетичної МОР проводилася шляхом підрахунку кількості колонієутворюючих одиниць (КУО) в одиниці

об'єму (1 мл) через 3 місяці експлуатації, що склало $3,1 \times 10^5$ КУО/мл. Результати мікроскопії виявили присутність спороутворюючих та споронеутворюючих бактерій родів *Bacillus*, *Citrobacter*, *Pseudomonas*, *Desulfovibrio* а також мікроводоростей – представників відділу *Chlorophyta* та *Cyanobacteria*.

Спектри поглинання контрольних (свіжоотримана МОР) і дослідних (відпрацьована МОР та відпрацьована МОР розведена свіжоотриманою з певним коефіцієнтом розведення DF (DF – dilution factor) реєстрували на спектрофотометрії СФ-4 в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 316\dots700$ нм при температурі $t = 20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Відпрацьована МОР є багатокомпонентною рідиною, суттєву неоднорідність якій додає присутність біологічної системи. Хід кривих, представлених на рисунку 1 має складну форму; спектральний аналіз є результатом суперпозиції спектрів поглинання різних хімічних компонентів. Для відпрацьованої МОР наявність піку між $\lambda = 650$ – 655 нм належить молекулам хлорофілу *a* зелених мікроводоростей та ціанобактерій. Пігменти мікроводоростей (каротиноїди) і фікобіліпротеїни мають максимум поглинання світла в більш короткохвильовій ділянці спектру $\lambda = 420$ – 480 нм, ніж молекули хлорофілу. В експерименті спектри поглинання фікобіліпротеїнів виражені досить суттєво на довжинах хвиль $\lambda = 545$ – 550 нм.

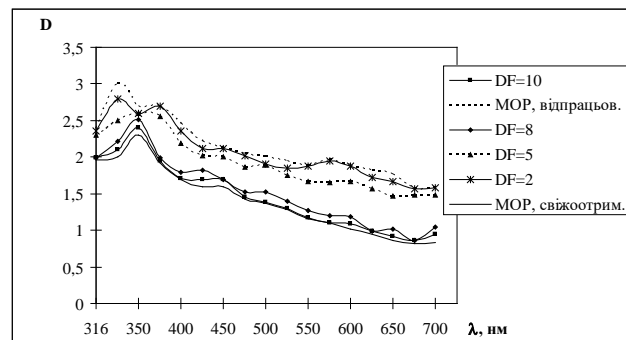


Рис. 1. Спектральна залежність оптичної щільності для контрольних та дослідних зразків МОР

Таблиця 1

Хіміко-технічні характеристики напівсинтетичної МОР

Параметр	Вимоги згідно нормативним документам	Фактичні значення	
		Контроль (МОР свіжоотримана)	Дослід (МОР відпрацьована, 3 місяці експлуатації)
Концентрація, %	5,0–7,0	5,7	5,2
Механічні домішки, мг/л	не більше ніж 300	11,0	167,0
Корозійний вплив на метал	відсутній	витримано	не витримано
pH	8,8–10,0	9,6	8,9
Біостійкість, бал	не більше 2	0	3

Максимум поглинання в області довжин хвиль $\lambda = 316\text{--}350$ нм обумовлений спектрами поглинання амінокислот, білкових та фенольних сполук, а також метаболітів мікрофлори – альгінатів, парамілону та ксантаніну [12, с. 148; 13 с. 3220], механізм дії яких на поверхню металу планується з'ясувати в наступному дослідженні із застосуванням методів молекулярного докінгу та молекулярної динаміки. Хоча, наразі, за присутністю спектрів поглинання, можна стверджувати про позитивний вплив метаболітів мікрофлори на параметри ϵ' та σ МОР (табл. 2).

Таблиця 2
Діелектрична проникність та динамічний поверхневий натяг МОР свіжоотриманої, МОР відпрацьованої та МОР відпрацьованої з певним DF

Зразки МОР	Параметр	
	$\epsilon' \times 10^{-10} \cdot \Phi/\text{м}$	$\sigma, \text{мН/м}$
Контроль МОР (свіжоотрим.)	1,918	65,1
МОР (відпрацьов.) (3 місяці експлуатації)	1,548	52,5
DF = 10	1,902	64,9
DF = 8	1,855	63,7
DF = 5	1,604	52,9
DF = 2	1,552	52,7

Експериментальне дослідження діелектричної проникності та динамічного поверхневого натягу контрольних зразків МОР показало різницю в цих параметрах в залежності від фізико-хімічних характеристик МОР, які вони набули при експлуатаційному навантаженні впродовж трьох місяців; різниця в значеннях ϵ' та σ по відношенню до

контрольних зразків складала $\Delta\epsilon' = 0,37 \times 10^{-10} \Phi/\text{м}$, $\Delta\sigma = 12,6 \text{ мН/м}$, відповідно. В ході експерименту реєстрували залежність параметрів ϵ' та σ від коефіцієнту розведення МОР (DF). По відношенню до відпрацьованих зразків показано, що для відпрацьованої напівсинтетичної емульсії розведеною свіжоотриманою МОР з DF = 10 та DF = 8, було характерно збільшення параметру ϵ' ; при DF = 10 реєстрували максимальне наближення значення ϵ' до значень ϵ' контрольних зразків. Суттєве збільшення параметру σ при DF = 10 ($\Delta\sigma = 12,4 \text{ мН/м}$) та DF = 8 ($\Delta\sigma = 11,2 \text{ мН/м}$) по відношенню до відпрацьованої МОР інтегрально відображає зміну кількісного та якісного складу поверхнево-активних речовин МОР і вказує на присутність органічної складової екзо- та ендометаболітів мікрофлори МОР, яким також притаманні поверхнево-активні властивості.

Висновки. Застосування результатів даної експериментальної роботи на Харківському підшипниковому заводі дозволило подовжити строки використання напівсинтетичної МОР на різних ділянках виробництва в 1,3–1,8 рази. Запропонований підхід, на основі позитивного ефекту метаболітів мікрофлори МОР, розглядається з точки зору зниження впливу затрат на закупівлю МОР, а також на собівартість продукції та екологічні аспекти металообробного підприємства.

Роботу виконано в рамках договору про науково-практичне співробітництво між ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України та ПАТ «Харківський підшипниковий завод «ХАРП»». Автори висловлюють вдячність колективу хіміко-технологічної лабораторії за методичну допомогу у проведенні дослідження та конструктивні поради щодо змісту роботи.

Список літератури:

1. Sultana N., Dhar N.R., Zaman R.B. A review on different cooling/lubrication techniques in metal cutting. *American Journal of mechanics and applications*. 2019. Vol. 7, №4. P. 71–87. doi:10.11648/j.ajma.20190704.11.
2. Nowak P., Kucharska K., Kaminski M. Ecological and health effects of lubricant oils emitted into the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16, 3002. P. 1–13. doi:10.3390/ijerph16163002.
3. Passman, F.J., Kuenzi P. Microbiology in water-miscible metalworking fluids. *Tribology Transactions*. 2020. Vol. 63, № 6. P. 1–47. doi:10.1080/10402004.2020.1764684.
4. Хмель Н.В. Эффективность применения терагерцового излучения при контаминации микрофлорой смазочно-охлаждающих жидкостей. *Серия «Биология, химия»*. 2014. Том. 27(66), № 2. С. 165–171.
5. Redetzky M., Rabenstein A., Palmowski B., Brinksmeier E. Microorganisms as a replacement for metal working fluids. *Advanced Materials Research*. 2014. Vols. 966–967. P. 357–364. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.966-967.357.
6. Redetzky M., Rabenstein A., Seidel B., Brinksmeier E., Wilhelm H. The influence of cell counts, cell size, EPS and microbial inclusions on the lubrication properties of microorganisms. *Production Engineering Research and Development*. 2015. Vol. 9, №2. P. 149–159. doi:10.1007/s11740-014-0592-5.

7. Колесников В.Г., Хмель Н.В., Хмель С.И. Оценка биологического заражения смазочно-охлаждающей жидкости в миллиметровом диапазоне радиоволн. *Физика живого*. 2012. Том. 20, № 2. С. 38–42.
8. Afsar M, Ding H. A novel open-resonator system for precise measurement of permittivity and loss-tangent. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. 2001. Vol. 50. P. 402–405.
9. Мериакри В.В. Диэлектрическая спектроскопия мм и субмм диапазонов волн и её применения. *Радиотехника*. 2005. № 8. С. 97–102.
10. Khmil N.V., Kolesnikov V.G. Evaluation of permittivity and surface tension of organic and synthetic lubricated and cooling liquids. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. Vol. 76, № 19. P. 1761–1767. doi:10.1615/TelecomRadEng.v76.i19.60.
11. Хміль Н.В., Колесніков В.Г., Хміль С.І. Експериментальне дослідження діелектричної проникності та динамічного поверхневого натягу мастильно-охолоджувальних рідин при барботуванні. *Радіофізика та електроніка*. 2021, Том. 26, № 4. С. 34–39. doi:10.15407/rej.
12. Salgado L.T., R. Tomazetto L.P., Cinelli M.F., Filho G. M. A. The influence of brown algae alginates on phenolic compounds capability of ultraviolet radiation absorption in vitro. *Brazilian journal of oceanography*. 2007. Vol. 55, №2. P. 145–154. doi:10.1590/S1679-87592007000200007.
13. Sundarrajan P., Eswaran P., Marimuthu A., Subhadra L.B., Kannaiyan P. One pot synthesis and characterization of alginate stabilized semiconductor nanoparticles. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2012. Vol. 33, №10. P. 3218–3224. doi:10.5012/bkcs.2012.33.10.3218.

Khmil N.V., Kolesnikov V.G., Khmil S.I. EXPERIMENTAL STUDY OF LUBRICANT-COOLING LIQUIDS REVITALIZATION FOR METAL-WORKING INDUSTRY

The control of dielectric constant (ϵ') and dynamic surface tension (σ) of semi-synthetic lubricant and cooling liquid (LCL) in the metalworking industry at the stages of the restoration of lubricating properties of LCL due to exogenous and endogenous microflora's metabolites was considered. The microwave dielectrometry of the region of γ -dispersion of the dielectric constant of free water (Ghana's diode generation frequency 37.7 GHz) with simultaneous sweep-mode of acoustic range 20...25000 Hz was a tool for quality control of metalworking emulsions.

The main element of the experimental complex was a waveguide line P1-39 (8-mm range), attenuator, piezoplatfom, measuring piezocell, and recording complex. Due to the fixed frequency of millimeter radiation generation, a precise estimate of the change in hydration of extracellular and intracellular metabolites of the LCL's microflora was provided (by an integral change in the amount of free and bound water of the metalworking emulsion).

The spectrophotometric measurements were performed: the absorption spectra of exo- and endomethabolites of the LCL's microflora system were analyzed at the wavelengths of the ultraviolet and visible ranges. An increase in the relative amount of free water when diluting spent LCL by freshly LCL with dilution factor (DF) DF=10 and DF=8 is shown, with $\Delta\epsilon' = 0.063 \times 10^{-10}$ F/m and $\Delta\epsilon' = 0.016 \times 10^{-10}$ F/m, respectively. Under these conditions, the parameter σ approached the value of the surface tension of the control samples, possibly due to organic metabolites of the contaminating microflora, which is confirmed by the data of spectral analysis in the visible region of wavelengths.

The application of the dielectric constant control system and dynamic surface tension of the LCL in the industry will provide regulation of the optimal concentration of microflora for a smooth cycle of emulsion supply with optimal lubricating characteristics in the production process. The obtained experimental data showed the feasibility of implementing a control system in the technology of intensive and cost-effective restoration of lubricating and cooling properties of metal-working emulsions on a production scale.

Key words: *microwave dielectrometry, lubricant-cooling liquids, revitalization, microflora, dielectric constant, dynamic surface tension.*