

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-89-95](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-89-95)
УДК 621.7.079

С.Є. Шейкін, д.т.н., проф.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України
Є.П. Мамуня, д.ф.-м.н., проф.
Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
В.С. Гаврилова, к.т.н., с.н.с
І.Ю. Ростоцький, к.т.н., с.н.с
С.Ф. Студенець, к.т.н.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

Технологічне мастило для формоутворення внутрішніх пазів у трубчастих виробх холодним пластичним деформуванням

У роботі наведено результати дослідження щодо створення ефективного рідкого технологічного мастила для обробки деталей з конструкційних легованих сталей методом деформуючого протягування (ДП) на основі визначення впливу введення до мастильної органічної основи антифрикційного наповнювача та наноструктурного компонента. Встановлено вплив складу на коефіцієнт динамічної в'язкості мастила, його термічні та експлуатаційні властивості, особливості структуроутворення.

Показано, що за одночасного введення наноструктурного компонента та антифрикційного наповнювача до мастильної основи спостерігається рівномірність розташування наноструктурного складника відносно частинок антифрикційного наповнювача та сприяння його ексfolіації. Формування такої структури сприяє позитивним змінам антифрикційних властивостей за рахунок покращення взаємного ковзання шарів наповнювача під час дії великих зсувних напружень. Методом термогравіметричного аналізу встановлено, що термодеструктивні процеси в матеріалі мастила до температури 100 °С не відбуваються. Температурна залежність динамічної в'язкості мастила в цьому діапазоні описується експоненціальним рівнянням Арреніуса. Введення наноструктурного компонента в поєднанні з антифрикційним наповнювачем змінює її характер: передекспоненціальний множник збільшується на 4 порядки, а енергія активації зменшується в 1,5 рази, тобто значно збільшується температурно незалежний коефіцієнт в'язкості та суттєво зменшується вплив температури на в'язкість мастила. Запропонована мастильна композиція дозволяє при обробці деталей з легованих конструкційних сталей знизити осьові сили ДП на ~ 20 % та отримати шорсткість обробленої поверхні на рівні 10–11 класу.

Ключові слова: деформуюче протягування; рідке мастило; мастильна органічна основа; антифрикційний наповнювач; наноструктурний неорганічний компонент; динамічна в'язкість; термічні властивості.

Вступ. У сучасному машинобудуванні існує клас деталей типу втулок, функціональне призначення яких вимагає наявність на їхній внутрішній поверхні поздовжніх пазів.

Існуючі сьогодні технологічні процеси виготовлення таких деталей можуть містити операції формоутворення пазів електрохімічними методами, різанням (шпалерне стругання, різальне протягування) та пластичним деформуванням (гаряче та холодне радіальне кування, деформуюче протягування, редукування на фасонній оправці).

На наш погляд використання методів холодного пластичного деформування, а саме деформуючого протягування (ДП) для формоутворення отворів фасонного профілю є дуже перспективним. Вони не потребують спеціального коштовного обладнання, а можуть бути реалізовані на серійному з використанням нескладного оснащення, дозволяють звести до мінімуму відходи матеріалу у стружку.

Деформуюче протягування (дорнування) – процес обробки отворів у деталях методом холодного ступінчастого пластичного деформування. Залежно від технологічних умов ДП контактний тиск у зоні взаємодії інструменту та оброблюваного виробу може сягати $9 \sigma_T$ (σ_T – границя плинності) оброблюваного металу [1, 2].

За цих умов реалізація процесу ДП можлива лише під час використання технологічних мастил (ТМ), які подаються в зону деформації на контактуючі поверхні інструменту та заготовки. ТМ в комплексі з оксидними плівками створює проміжне тіло, яке запобігає схоплюванню інструменту з оброблюваним матеріалом. За наявності розділової мастильної плівки деформація металу відбувається за участю ТМ [3].

Метою цієї роботи було одержання ефективного технологічного рідкого мастила для обробки деталей із конструкційних легованих сталей методом ДП на основі встановлення особливостей структуроутворення отриманих матеріалів з використанням електронної мікроскопії та визначення впливу

введення антифрикційного наповнювача та наноструктурного компонента на коефіцієнт динамічної в'язкості мастила, його термічні та експлуатаційні властивості.

Методика експерименту. До мастильної зв'язувальної основи, сформованої з органічних сполук, вводили наноструктурний неорганічний компонент [4–6], а також антифрикційний наповнювач [7] (в цій роботі використали колоїдний графіт).

Дослідження структури зразків мастила проводили на сканувальному електронному мікроскопі (SEM) EVO 50XVP («Carl Zeiss», Germany), роздільна здатність якого під час використання вольфрамового катоду становить 3 нм.

Структуру зразків мастила досліджували також на трансмісійному електронному мікроскопі JEM JEOL 1230 за прискорювальної напруги 100 кВ. Вказаний мікроскоп має роздільну здатність $\leq 0,5$ нм. Зображення отримували цифровою фотокамерою Gatan.

Для дослідження структури методами СЕМ і ТЕМ зі зразків мастила готували суспензію в уайт-спіриті із застосуванням ультразвукової обробки. Фіксований об'єм (50 мкл) отриманої суспензії відбирали за допомогою автоматичної мікропіпетки і наносили на поверхню мідної бленди, покритої формваровою плівкою, після чого висушували. Приготовані таким чином препарати проглядали у вказаних мікроскопах [8].

Реологічні вимірювання динамічної в'язкості зразків мастила проводили на ротаційному реометрі моделі AR 2000 в режимі течії в діапазоні швидкостей зсуву $1,25\text{--}125\text{ c}^{-1}$ за температур 20, 40, 60, 80, 100 °С.

Методом термогравіметричного аналізу (ТГА) [9] було проведено дослідження процесу зміни маси зразків рідкого мастила за високої температури. Дослідження проводили на дериватографі Q1500 D системи Paulik – Paulik – Erdey (Угорщина) в динамічному режимі в діапазоні температур 20–600 °С за швидкості нагрівання $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{хв}^{-1}$. Як зразок порівняння використовували оксид алюмінію. Дослідження проводили в середовищі кисню повітря. Маса зразків становила 100 мг. Похибка вимірювань не перевищувала 5 %.

Оцінку експлуатаційних характеристик технологічних мастил проводили за методикою, що відповідає реальному процесу ДП. Через отвір втулки з нанесеним на його поверхню мастилом пропускали деформуючі елементи [2]. При цьому розмір кожного наступного елемента більше за попередній, що забезпечувало підвищення контактного тиску. У процесі випробувань проводили вимірювання осьової сили тензометричним динамометром. Про схоплювання судили по різкому її збільшенню, налипанню оброблюваного матеріалу на інструмент та утворенню дефектів на обробленій поверхні у вигляді задирів. Контактний тиск, що передує схоплюванню, а також кількість пропущених до схоплювання деформуючих елементів характеризують експлуатаційні властивості технологічного мастила.

Результати дослідження та їх обговорення. Дослідження структури зразків мастила показало, що введення наноструктурного неорганічного компонента забезпечує рівномірний розподіл частинок зв'язувальної органічної основи за рахунок протидії їхній конгломерації (рис. 1).

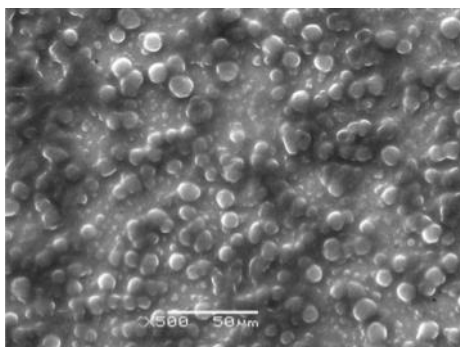


Рис. 1. Структура мастильної зв'язувальної основи, сформованої з частинок органічної складової розміром ~ 10 мкм та наночастинок наноструктурного неорганічного компонента за результатами СЕМ

За одночасного введення наноструктурного неорганічного компонента та антифрикційного наповнювача спостерігається зміна в характері агрегації та розподілу останніх в органічній основі. Порівняння композиції без додавання наноструктурного складника (рис. 2, а) з системою, яка містить добавки такого складника (рис. 2, б), вказує на рівномірне розташування останнього відносно частинок антифрикційного наповнювача та сприяння в створенні більш «розпушеної» структури за рахунок ексfolіації шарів наповнювача. Формування такої структури може сприяти позитивним змінам

антифрикційних властивостей за рахунок покращення взаємного ковзання шарів наповнювача під час дії великих зсувних напружень.

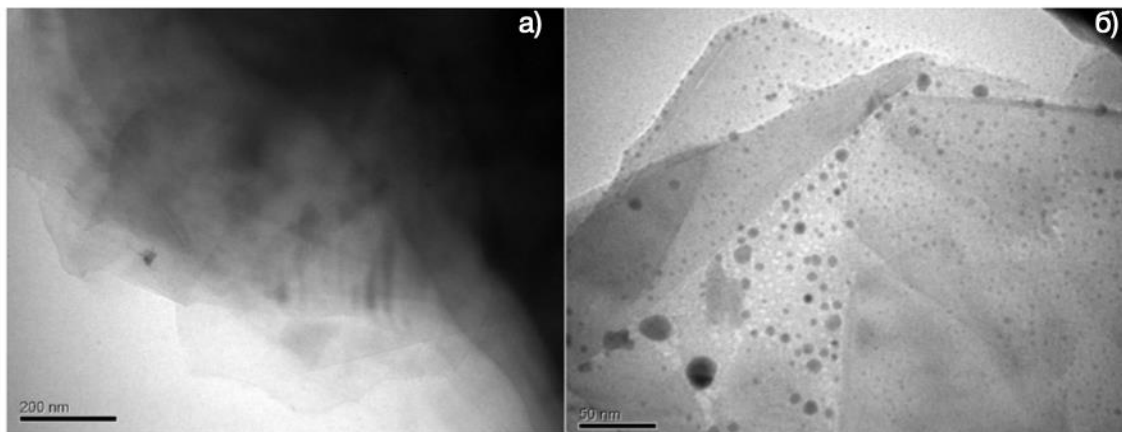


Рис. 2. ТЕМ-зображення структури частинок антифрикційного наповнювача в мастильній композиції без (а) та при додаванні наноструктурного неорганічного компонента (б)

Одночасне введення наноструктурного неорганічного компонента і антифрикційного наповнювача впливає також на в'язкість рідкого мастила.

Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості зразків рідкого мастила від температури наведено на рисунку 3.

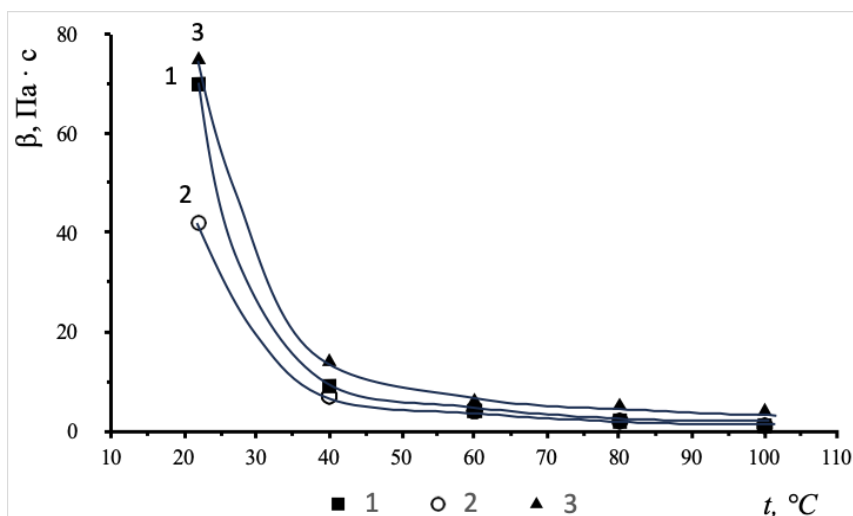


Рис. 3. Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості зразків рідкого мастила від температури: 1–3 – склад зразків мастила (табл. 1)

Введення добавок до мастильної зв'язувальної основи найбільш суттєво змінює в'язкість за кімнатної температури, причому одночасне додавання антифрикційного наповнювача і наноструктурного компонента її підвищують. У той же час зростання температури веде до зменшення в'язкості всіх зразків мастила, а також до зближення їхніх значень за високих температур.

Як правило, температурні залежності в'язкості рідин описуються в координатах $\ln\beta - 1/T$ [10], де β – динамічний коефіцієнт в'язкості, T – температура в К. На рисунку 4 показано одержані залежності в координатах $\ln\beta - 10^3$.

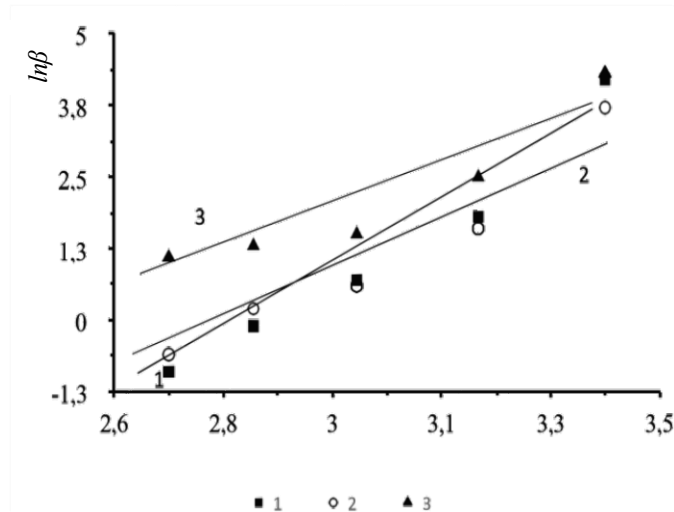


Рис. 4. Температурна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості зразків рідкого мастила в координатах $\ln\beta - 10^3/T$: 1–3 – склад зразків мастила (табл. 1)

Як видно з рисунка 4, одержані температурні залежності можна описати експоненційним рівнянням Арреніуса:

$$\beta = \beta_0 \exp(E_a / RT),$$

де β_0 – передекспоненційний множник, який не залежить від температури, E_a – енергія активації процесу течії, R – універсальна газова стала. В таблиці наведено значення β_0 та E_a для досліджених зразків мастила.

Таблиця 1

Склад та характеристики динамічної в'язкості зразків рідкого мастила

№ зразка	Склад	β_0 , Па·с	E_a , кДж/моль
1	Мастильна зв'язувальна основа	$4,38 \cdot 10^{-9}$	56,38
2	Мастильна зв'язувальна основа + антифрикційний наповнювач	$7,80 \cdot 10^{-8}$	48,83
3	Мастильна зв'язувальна основа + наноструктурний неорганічний компонент + антифрикційний наповнювач	$1,782 \cdot 10^{-5}$	36,02

Наведені дані показують, що введення наноструктурного компонента в поєднанні з антифрикційним наповнювачем досить суттєво змінює характер температурної залежності коефіцієнта динамічної в'язкості мастила: передекспоненційний множник збільшується на 4 порядки, а енергія активації зменшується в 1,5 раза, тобто ця операція приводить як до значного збільшення температурно незалежного коефіцієнта в'язкості, так і до суттєвого зменшення впливу температури на в'язкість мастила.

Такий характер зміни параметрів рівняння Арреніуса, а саме β_0 , вказує на підвищення в'язкості при додаванні наноструктурного неорганічного компонента (β_0 змінюється більше, ніж на 2 порядки при переході від зразка 2 до зразка 3), в той ж час суттєве зменшення величини енергії активації E_a свідчить про полегшення процесу течії мастила за наявності наноструктурної добавки.

На рисунку 5 наведено результати досліджень методом ТГА зразків, до складу яких входили: мастильна зв'язувальна основа (крива 1), мастильна зв'язувальна основа + наноструктурний неорганічний компонент (крива 2а), мастильна зв'язувальна основа + антифрикційний наповнювач (крива 2б), (мастильна зв'язувальна основа + наноструктурний неорганічний компонент + антифрикційний наповнювач (крива 3). На графіку нанесені величини залишкової маси зразків (%) після температурної дії, а також температури процесів деструкції (°C) в різних температурних діапазонах. Метод ТГА передбачає поступове збільшення температури до високих значень (600 °C), коли органічна частина повністю згорає. Під час нагрівання зразка фіксується втрата маси (%) внаслідок термодеструктивних процесів у матеріалі

мастила. Повна крива ТГА для всіх зразків має три переходи втрати маси з одного плато на наступне, що відповідає процесам, які відбуваються у зразку за певної температури.

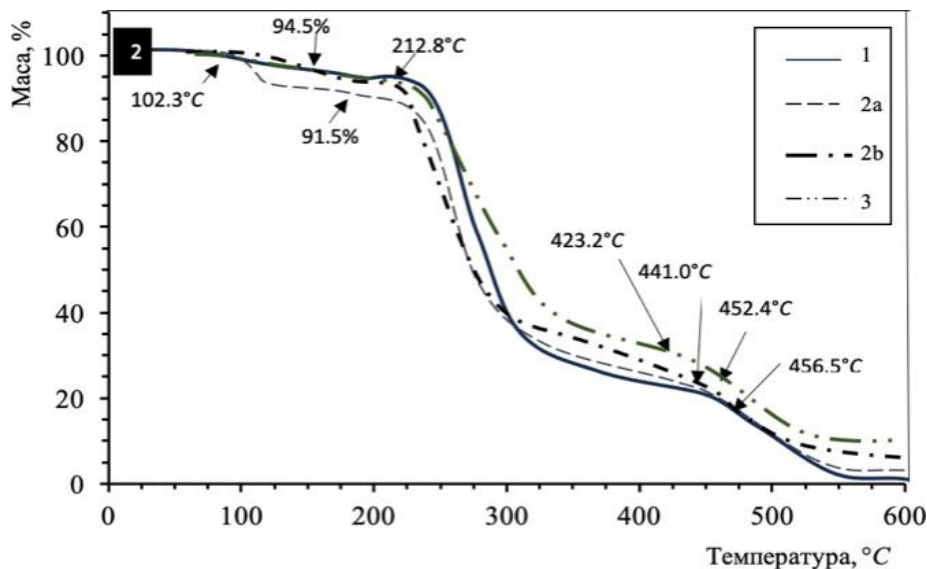


Рис. 5. Результати вимірювань температурної залежності маси зразків мастила методом ТГА (позначення зразків мастила описано в тексті)

Перший перехід відбувається за температури майже 100 °C і відповідає видаленню легколетких сполук, які були в зразках мастила.

Другий перехід відбувається в однаковому температурному діапазоні 200–220 °C для всіх зразків з наступною втратою маси від 90 % за температури 210 °C до 30–40 % при 300 °C. Цей перехід можна визначити як початок низькотемпературної термодеструкції зразків. Температури третього переходу є різними для всіх зразків (позначені на рис. 4), причому залишок маси всіх зразків становить майже 20 % за цих температур. Цей перехід пов'язаний з початком другого етапу термодеструкції зразків, тобто високотемпературної деструкції. Найвища температура 456,5 °C спостерігається для ненаповненої мастильної основи (зразок 1), інші зразки мастила розташовуються в ряду зразок 3 (452,4 °C) – зразок 2a (441,0 °C) – зразок 2b (423,2 °C). Можна зробити припущення, що різниця між поведінкою зразків у другому та третьому переходах обумовлена незалежністю початку процесів низькотемпературної деструкції (200–220 °C) від наявності наповнювачів та їх природи, тобто за цієї температури відбувається деструкція в об'ємі мастильної зв'язувальної основи. Що стосується третього переходу (420–480 °C), тобто високотемпературної деструкції, то залежність температури переходу від типу наповнювача вказує на те, що відбувається деструкція мастила, яке зв'язане з поверхнею наповнювача, тобто переважно адсорбованого шару мастила. Умови адсорбції різні для кожного наповнювача і для їхньої комбінації.

Для визначення змісту мастила було проведено обробку складнопрофільних отворів у деталях зі сталі 38Х2МЮА (HRC 29...32), діаметром 29,4 мм. Вихідні значення шорсткості за параметром Ra становили 3,41 мкм.

В результаті визначено вміст колоїдного графіту в мастилі, який дозволив провести обробку без ознак схоплювання (табл. 1, зразок № 2), та забезпечив необхідну шорсткість поверхні. На виступах профілю Ra 0,506...0,783 мкм, на западинах Ra 0,239 мкм.

При цьому загальна осьова сила становила 274 кН. Для зменшення сили тертя необхідно підвищити адгезію мастила до металу та покращити взаємне ковзання шарів наповнювача під час дії великих зсувних напружень. Це досягається за рахунок введення до описаної вище мастильної композиції наночастинок органосиланів (зразок № 3).

При використанні зразка мастила № 3 зі структуруючим агентом (наночастинками) значення шорсткості по виступах (Ra 0,603 мкм) і западинах (Ra 0,108 мкм) були нижчими, ніж при використанні зразка мастила № 2, а загальна осьова сила становила 210 кН, тобто введення до мастильної композиції наночастинок дозволило знизити на 23 % силові параметри процесу.

Висновок. Таким чином, запропоновано мастильну композицію, яка під час обробки ДП для формоутворення круглих та складнопрофільних внутрішніх поверхонь деталей сталей 38Х2МЮА дозволяє знизити осьове навантаження на 23 % та отримати оброблену поверхню на рівні 10–11 класу.

Список використаної літератури:

1. Special features of shaping longitudinal slots on inner surfaces of tubular workpieces by cold plastic deformation / O.A. Rozenberg, V.G. Delevi, S.E. Sheikin and other // *Nadtverdi materialy*. – 1997. – Vol. 19, № 1. – P. 30–37.
2. On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular Products / S.Ye. Sheykin, V.V. Melnichenko, S.F. Studenets and other // *Journal of Superhard Materials*. – 2021. – Vol. 43. – P. 222–230. DOI: 10.3103/S1063457621030096.
3. Белоконь Ю.О. Фізичні процеси при пластичній деформації : навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 136 «Металургія» освітньо-професійної програми «Обробка металів тиском» / Ю.О. Белоконь. – Запоріжжя : ЗНУ, 2023. – 176 с.
4. Пат. 107527 Україна, МПК, С10М 175/00 С08L 63/00. Антифрикційний матеріал для холодної обробки металів тиском / В.С. Гаврилова, В.М. Михальчук, С.В. Жильцова, Т.І. Григоренко, І.Ю. Ростоцький, С.Є. Шейкін, Є.О. Пащенко ; заявник і патентовласник Інститут надтвердих матеріалів НАН України. – заявл. 24.07.13 ; опубл. 12.01.2015, Бюл. № 1.
5. Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології / під ред. А.П. Шпака та ін. – К. : Академперіодика, 2003. – Т. 1, Вип. 1. – 328 с.
6. Ubbelonde A.R. Graphite and its crystal compounds / A.R. Ubbelonde, F.A. Lewis. – Oxford : Clarendon Press, 1960. – 217 p.
7. Вплив концентрації вуглецевого, базальтового волокон і графіту на теплопровідність та зношування композиційного матеріалу на основі ароматичного поліаміду / Г.О. Сіренко, Л.В. Базюк, В.П. Свідерський, С.М. Тараненко // *Полімерний журнал*. – 2006. – Т. 28, № 3. – С. 214–222.
8. Щербатюк М.М. Підготовка зразків рослинних тканин для електронної мікроскопії (теоретичні та практичні аспекти) : метод. посіб. / М.М. Щербатюк, В.О. Бриков, Г.Г. Мартин. – К. : Талком, 2015. – 62 с.
9. Paulik F. Derivatography: A complex method in thermal analysis / F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey // *Talanta*. – 1966. – Vol. 13, Issue 10. – P. 1405–1430.
10. Каданер Л.І. Фізична і колоїдна хімія / Л.І. Каданер. – Київ : Вища школа, 1983. – 287 с.

References:

1. Rozenberg, O.A., Delevi, V.G., Sheikin, S.E. et al (1997), «Special features of shaping longitudinal slots on inner surfaces of tubular workpieces by cold plastic deformation», *Nadtverdi materialy*, Vol. 19, No. 1, pp. 30–37.
2. Sheykin, S.Ye., Melnichenko, V.V., Studenets, S.F. et al. (2021), «On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular», *Journal of Superhard Materials*, Vol. 43, Issue 3, pp. 222–230, doi: 10.3103/S1063457621030096.
3. Bielokon, Yu.O. (2023), *Fizychni protsesy pry plastychnii deformatsii, navchalnyi posibnyk dlia zdobuvachiv stupenia vyshchoi osvity mahistra spetsialnosti 136 «Metalurhiiia» osvitno-profesiinoi prohramy «Obrobka metaliv tyskom»*, ZNU, Zaporizhzhia, 176 p.
4. Havrylova, V.S., Mykhalchuk, V.M., Zhylytova, S.V., Hryhorenko, T.I., Rostotskyi, I.Iu., Sheikin, S.Ie. and Pashchenko, Ye.O. (2015), *Pat. 107527 Ukraina, MPK, C10M 175/00 C08L 63/00. Antyfrktsiyni material dlia kholodnoi obrobky metaliv tyskom, zaiavnyk i patentovlasnyk Instytut nadtverdykh materialiv NAN Ukrainy*, zaiavl. 24.07.13, opubl. 12.01.2015, Biul. No. 1.
5. Shpak, A.P. et al. (ed.) (2003), *Nanosystemy, nanomaterialy, nanotehnolohii*, Akademperiodyka, K., Vol. 1, Issue 1, 328 p.
6. Ubbelonde, A.R. and Lewis, F.A. (1960), *Graphite and its crystal compounds*, Clarendon Press, Oxford, 217 p.
7. Sirenko, H.O., Baziuk, L.V., Sviderskyi, V.P. and Taranenko, S.M. (2006), «Vplyv kontsentratsii vuhletsevoho, bazaltovoho volokon i hrafitu na teploprovodnist ta znoshuvannia kompozytsiinoho materialu na osnovi aromatychnoho poliamidu», *Polimernyi zhurnal*, Vol. 28, No. 3, pp. 214–222.
8. Shcherbatiuk, M.M., Brykov, V.O. and Martyn, H.H. (2015), *Pidhotovka zrazkiv roslynnykh tkanyn dlia elektronnoi mikroskopii (teoretychni ta praktychni aspekty)*, metod. posib., Talkom, K., 62 p.
9. Paulik, F., Paulik, J. and Erdey, L. (1966), «Derivatography: A complex method in thermal analysis», *Talanta*, Vol. 13, Issue 10, pp. 1405–1430.
10. Kadaner, L.I. (1983), *Fizychna i koloidna khimiia*, Vyshcha shkola, Kyiv, 287 p.

Шейкін Сергій Євгенович – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу «Формування прецизійних елементів складнопрофільних виробів» Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ.

<https://orcid.org/0000-0001-9958-4293>.

Наукові інтереси:

- холодне поверхневе пластичне деформування;
- модифікація поверхневого шару;
- підвищення експлуатаційних характеристик.

Мамуня Євген Петрович – доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу «Полімерних композитів» Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України, м. Київ.

<https://orcid.org/0000-0003-3855-2786>.

Наукові інтереси:

- електрофізичні властивості полімерів і полімерних композицій;
- залежності електричних, діелектричних, теплофізичних, механічних властивостей від структури та технології отримання гетерогенних полімерних систем.

Гаврилова Валентина Степанівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу «Формування прецизійних елементів складнопрофільних виробів» Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ.

Наукові інтереси:

- розробка антифрикційних технологічних мастил для обробки деталей з конструкційних сталей та титанових сплавів методом холодної пластичної деформації.

Ростоцький Ігор Юрійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу «Формування прецизійних елементів складнопрофільних виробів» Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ.

<https://orcid.org/0000-0003-3454-8990>.

Наукові інтереси:

- холодне поверхневе пластичне деформування;
- модифікація поверхневого шару;
- підвищення експлуатаційних характеристик.

Студенець Сергій Федорович – кандидат технічних наук, заступник завідувача відділу «Формування прецизійних елементів складнопрофільних виробів» Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ.

<https://orcid.org/0009-0000-2126-5903>.

Наукові інтереси:

- холодне поверхневе пластичне деформування;
- модифікація поверхневого шару;
- підвищення експлуатаційних характеристик.

Sheykin S.Ye., Mamunya Ye.P., GavriloVA V.S., Rostotskyi I.Yu., Studenets S.F.

Technological lubricant for forming internal grooves in tubular products by cold plastic deformation

The paper presents the results of research on the creation of an effective liquid technological lubricant for the processing of structural alloy steel parts by the method of deformation drawing (DP) based on the determination of the effect of the introduction of an antifriction filler and a nanostructural component into the lubricating organic base. The influence of the composition on the coefficient of dynamic viscosity of the lubricant, its thermal and operational properties, features of structure formation was established.

It is shown that with the simultaneous introduction of a nanostructured component and an antifriction filler to the lubricating base, the uniformity of the location of the nanostructural component relative to the particles of the antifriction filler and the promotion of its exfoliation are observed. The formation of such a structure contributes to positive changes in antifriction properties due to the improvement of mutual sliding of filler layers during the action of high shear stresses. Using the method of thermogravimetric analysis, it was established that thermdestructive processes do not occur in the lubricant material up to a temperature of 100°C. The temperature dependence of the dynamic viscosity of the lubricant in this range is described by the exponential Arrhenius equation. The introduction of a nanostructured component in combination with an antifriction filler changes its character: the pre-exponential factor increases by 4 orders of magnitude, and the activation energy decreases by 1.5 times, that is, the temperature-independent viscosity coefficient increases significantly and the effect of temperature on the viscosity of the lubricant significantly decreases. The proposed lubricant composition makes it possible to reduce the axial forces of DP by ~ 20% and obtain the roughness of the treated surface at the level of class 10-11 when processing parts from alloyed structural steels.

Keywords: deforming broaching; liquid lubricant; lubricating organic base; antifriction filler; nanostructured inorganic component; dynamic viscosity; thermal properties.

Стаття надійшла до редакції 14.02.2024.