

УДК 678

**Ф.І. Василенко, проф., канд. техн. наук, І.Ф. Василенко, доц., канд. техн. наук,  
О.П. Бруцький, асп.**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## Теоретичні передумови відновлення підшипників ковзання поліамідними композиціями з накладенням ультразвукових коливань

Наведені результати теоретичних досліджень, спрямованих на використання ультразвукових коливань при відновленні підшипників ковзання жниварок збиральних машин тонкошаровими покриттями литтям під тиском склонаповнених поліамідних композицій.

**ультразвукові коливання (УЗК), склонаповнені поліамідні композиції (СПК), розплави, підшипники ковзання (ПК), композиційні покриття (КП)**

У різних областях переробки полімерів зростає увага до використання ультразвуку. Висока ефективність метода дає можливість використовувати ультразвукові технології як у якості основних, так і у якості допоміжних способів [1]. Так, наприклад [2], використання вібраційної техніки дає можливість передавати перероблюваному матеріалові значні знакозмінні прискорення, внаслідок чого у полімерах протікає цілий ряд специфічних фізичних і хімічних процесів. Вони дозволяють підвищити якість готових виробів та знизити трудомісткість технологічних процесів. У багатьох випадках під дією УЗК підвищується структурна однорідність, знижується рівень залишкових напружень та покращуються технологічні властивості матеріалів.

При введенні в оброблюване ультразвуком середовище джерела коливань у ньому встановлюється ультразвукове поле, характеристики якого залежать від параметрів джерела коливань та властивостей оброблюваного матеріалу. Основним параметром поля є швидкість розповсюдження пружних коливань, величина яких визначається фізичними властивостями речовини.

У рідинах, пружні властивості яких залежать від стисливості, швидкість звуку (с) визначається з рівняння:

$$\tilde{n} = \sqrt{\frac{1}{\beta\rho}},$$

де  $\beta$  – стисливість при постійній температурі;

$\rho$  – щільність середовища.

Важливою характеристикою ультразвукового поля є звуковий тиск (р), що має такий вираз:

$$\delta = p_0 + A\rho\tilde{n}\omega \cos \omega t,$$

де  $p_0$  – тиск навколишньої атмосфери;

$A$  – амплітуда коливань максимального значення;

$\omega$  – кутова частота;

$t$  – координата часу.

Другий член рівняння являє собою власне звуковий тиск, що викликаний розповсюдженням пружних хвиль.

За встановленими в акустиці правилами питому енергію ультразвуку прийнято оцінювати за допомогою його інтенсивності ( $I$ ).

$$I = \frac{F}{S},$$

де  $F$  – повна енергія ультразвуку;

$S$  – площа випромінювача.

Поширення ультразвуку чиниться з внутрішніми втратами на поглинання. При вимірюванні амплітуди коливань розплаву, збудженої УЗК, на початку ( $x_1$ ) і у кінці ( $x_2$ ) в об'ємі, то рівняння коефіцієнту поглинання ( $\alpha$ ) має вигляд:

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right),$$

де  $A_1$  та  $A_2$  – відповідно амплітуда УЗК в об'ємах  $x_1$  та  $x_2$ .

Ультразвукова хвиля на межі середовищ з різним хвильовим опором зазнає відбиття або заломлення. Коефіцієнт відбиття ( $R$ ) визначається:

$$R = \left( \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2,$$

де  $\rho_1$  та  $\rho_2$  – відповідно щільність розплаву та наповнювача;

$c_1$  та  $c_2$  – відповідно швидкість звуку у розплаві та наповнювачі.

Вирішальними чинниками довговічності деталей сільськогосподарських машин відновлених тонкошаровими полімерними покриттями є абразивна їхня стійкість та міцність зчеплення покриття зі зношеною поверхнею деталі.

Зчеплення полімеру з наповнювачем та у цілому композиції з металевою основою визначається адгезією полімерної матриці до волокна і до матеріалу ПК; усадкою при затвердженні; відношенням температурного коефіцієнта лінійного розширення волокна, основи і покриття; характером підготовки спрацьованої поверхні, фізико-хімічними властивостями та структурною упорядкуванням матриці; наявністю на поверхні розподілу порожнин та газових включень. Існують різні теорії адгезії між матрицею та наповнювачем в композиційному матеріалі [3].

Через те, що поліаміди відносяться до хімічно-інертних речовин, то для композицій на їх основі характерним є механічне зчеплення [4] при якому адгезійний зв'язок між полімером і субстратом утворюється внаслідок затікання полімеру у мікрodefекти на поверхні основи [5]. У загальному вигляді функція, що визначає глибину затікання ( $l$ ) має вигляд:

$$l = f(d, p, \eta, t),$$

де  $d$  – діаметр каналу;

$p$  – тиск при вході в канал;

$\eta$  – в'язкість розплаву;

$t$  – час зовнішньої дії.

Дуже чутливо полімерні матеріали реагують на діяння зовнішніх факторів [6, 7].

УЗК сприяють внутрішнім перетворенням, які впливають на працездатність матеріалів відновлених деталей.

Однією з особливостей діяння УЗК на процеси, що відбуваються в рідинах, є збільшення висоти підйому рідини та швидкості її руху у тонких капілярних трубках [8], що

суттєво впливає на адгезію матриці до субстрату. Звукокапілярний тиск ( $P_x$ ) збільшується по мірі зменшення діаметру капіляра і не залежить від його матеріалу [9]:

$$P_x = C P_m^2,$$

де  $C$  – постійна, що залежить від діаметру капіляра;

$P_m$  – звуковий тиск у зрізі капіляра.

Звукокапілярний ефект проявляє себе у різних технологічних процесах. Під дією УЗК прискорюється у десятки і сотні раз просочення пористо-капілярних тіл [3], значно інтенсифікується просочування металокерамічних виробів різними рідинами, різних технічних виробів клеями і лаками тощо. Звукокапілярний ефект використовується при паянні складних виробів, тому що він забезпечує проникнення гарячого припою одночасно у всі зазори і цим підвищує якість з'єднання [8].

Більшість процесів ультразвукової обробки починаються з посиленого проникнення рідини у капілярні щілини твердих тіл та їхнього розклинювання. Звукокапілярний ефект, на наш погляд, буде мати велике значення і у процесі ультразвукової обробки СПК. Дія ультразвуку на розплав композиції (УЗК інтенсифікують процес розщеплення макромолекул полімерів, через що знижується їхня в'язкість), будуть сприяти затіканню розплаву поліаміда у мікродефекти скловолокна та основи, на яку вони наносяться внаслідок механічної взаємодії. Адгезійна міцність пропорціональна глибині затікання адгезиву в субстрат, а величина глибини затікання у великій мірі залежить від їхнього акустичного контакту.

Для акустичного контакту твердої частки з розплавом необхідно, щоб її поверхня була змочена цим розплавом. При цьому мірою змочування вважають крайовий кут ( $\Theta$ ).

Найкраще змочування в ультразвуковому полі визначається умовою рівноваги каплі.

$$\cos \Theta = \frac{\sigma_T - \sigma_{T,p}}{\sigma_p}, \quad (1)$$

де  $\sigma_T, \sigma_{T,p}, \sigma_p$  – відповідно поверхневі енергії на границях розподілу тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина, рідина – газ.

Для розплавів СПК співвідношення (1) спрощується тому що  $\sigma_T = 0$ , а саме:

$$\cos \Theta = -\frac{\sigma_{T,p}}{\sigma_p}.$$

Знак мінус означає, що поверхнева енергія розплаву при змочуванні твердої поверхні зменшується. Змочування залежить від величини поверхневого натягнення розплаву та поверхневого натягнення на границі розплав – тверде тіло. Основою для встановлення зв'язку між величиною змочування та величиною адгезії може служити те, що енергію зчеплення рідини з твердим тілом можна прирівняти роботі  $W$ , необхідної для видалення плівки з поверхні твердого тіла.

$$W = \sigma_p (1 + \cos \Theta),$$

де  $\sigma_p$  – поверхнева енергія рідини.

Проникнення розплаву в капіляр полягає у подоланні опору капілярного тиску, що дорівнює:

$$P = 2\sigma_p \cos \Theta / r,$$

де  $r$  – розмір капіляра.

Адгезійний зв'язок у СПК вплине на міцність, а змочування субстратів розплавом позначиться на зміні фізико-механічних та експлуатаційних властивостей покриття. Ультразвукова обробка приводить до значного (приблизно у 2 рази) зменшення кута змочування субстрату адгезивом. При цьому після ультразвукової обробки кут змочування зберігає своє значення.

УЗК сприяють навіть змочуванню не змочувальних твердих тіл. Так відомі випадки [10], коли за допомогою ультразвуку в рідинній фазі вдалося металізувати кераміку та скло. Поясненням цьому є не тільки змінення поверхневого натягнення, а і якісним очищенням поверхні від різного роду забруднень і плівок.

Якість змочування відображується на кількості порожнин у структурі склопластику [11] та на границі розділу з основою. Порожнини, що являють собою концентратори напруг, суттєво впливають на механічні властивості композиції [12] та експлуатаційні властивості КП (рис. 1).

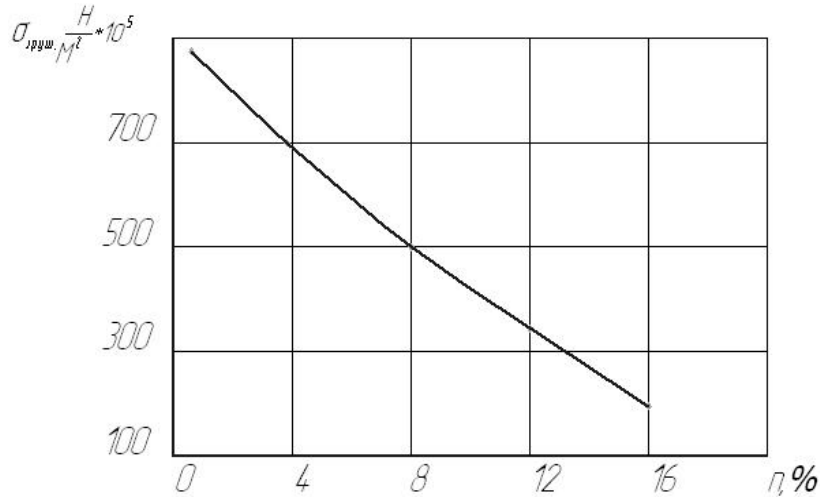


Рисунок 1 – Залежність міцності склопластику ( $\sigma_{зруш.}$ ) від вмісту порожнин у структурі (n) [17]

Загальновідома роль УЗК у процесі диспергування при обробці розплавів. Наявність поверхневого контакту між рідким розплавом і твердою фазою приводить до інтенсифікації процесу кавітації, а отже і диспергування. Найбільша швидкість диспергування досягається при температурі вище 333К, коли кавітаційна дія максимальна [13].

Є такі дані [3], що у композиційних матеріалах тверда поверхня наповнювача покривалася плівкою жиру, який осідав з повітря. Ультразвукові хвилі визивають руйнування забруднень на поверхні твердих тіл, видаляють різного роду утворення поверхневих плівок, або прискорюють поверхневі ефекти [14].

На границі розділу розплаву та наповнювача утворюються кульки газу. Швидкість спливання газових кульок (v) за формулою Стокса дорівнює:

$$v = \frac{2r^2(\rho_1 - \rho_2)}{9\eta g},$$

де r – розмір газової кульки;

g – прискорення сили тяжіння.

Процес дегазації виконується різними методами, але перевага завжди віддається ультразвуковій обробці, тому що вона суттєво підвищує суцільність, щільність та зменшує пористість матеріалу (рис. 2).

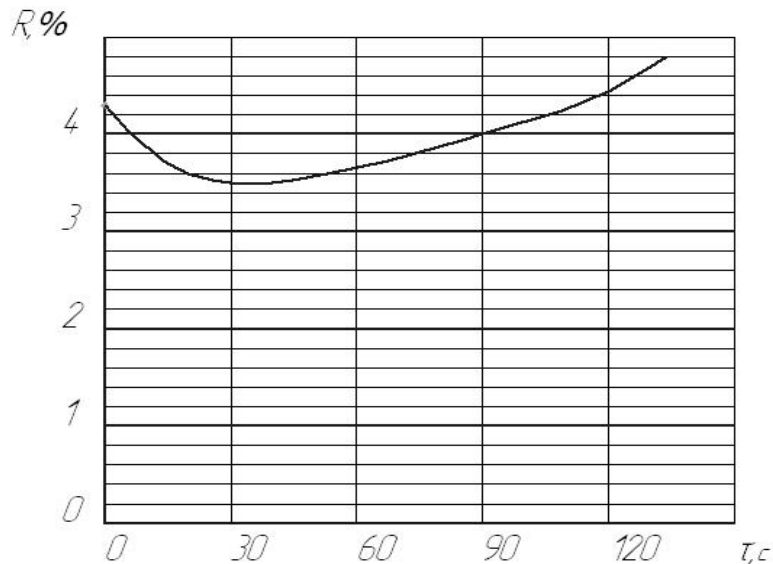


Рисунок 2 – Залежність пористості адгезиву (R) від тривалості ультразвукової обробки (τ) [18]. Амплітуда коливань інструменту  $2A=5$  мкм

Вплив УЗК на газові кульки та в'язкість розплаву приводить до зміни швидкості їх видалення, частина газу розчиниться. Прикладення тиску перешкоджає газовиділенню, але і у той же час приводить до покращення розчинності газу. Автори [15] встановили межу розчинності S газу в розплаві під дією вібрацій.

$$S = k \frac{\omega}{2\pi} \int \sqrt{p_{\text{ат}} + \rho_p h (1 + A\omega^2 \sin \omega t)},$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорціональності;

$p_{\text{ат}}$  – атмосферний тиск;

$\rho_p$  – щільність розплаву;

$h$  – висота рівня розплаву.

Щільність матеріалу після ультразвукової обробки підвищується і дегазація проходить успішно. За дослідженнями [20] акустичні потоки та звуковий тиск створюють умови для видалення газових кульок.

Адгезія також впливає на умови створення тріщин та втомувальну міцність матеріалів. Підвищенню міцності зчеплення сприяє спеціальна підготовка поверхні під нанесення покриття. Це видалення всякого роду забруднень, залишків мастил, воску, жирів, механічна, термомеханічна обробки тощо. І тут важливе місце відводиться УЗК.

Експериментально і теоретично доказано, що кристалізація у наявності зародків зовнішнього механічного поля може привести до інтенсивного утворення кристалізації.

Час, який необхідний для утворення центрів кристалізації, скорочується вдвічі при прикладенні деформації зсуву. Не змінюючи будову, властивостями полімерів можна варіювати у широких межах змінюючи різними прийомами їхню надмолекулярну структуру.

При накладенні ультразвукової хвилі значної потужності на розплави завжди спостерігається інтенсивне перемішування. Причиною його, окрім власне коливального руху в'язкої (рідкої) фази, є виникнення у розплаві акустичних течій. Дія акустичних течій – це постійний потік частинок розплаву, які оказують тиск на тверді та газоподібні включення, що зустрічаються на їхньому шляху.

Доказано [19], що УЗК, активізуючи сили в'язкого тертя на границі розплав – домішка, сприяють перетворенню ряду неактивних домішок у зародки кристалізації. При цьому здрібнювання розплаву з домішками під дією ультразвуку завжди є більшим, ніж здрібнювання без домішок.

Від умов кристалізації полімеру залежить його ступінь кристалічності, кількість та досконалість кристалічних областей, вид і розміри надмолекулярних структур, які у значній мірі визначають експлуатаційні властивості покриттів.

Ультразвукова обробка сприяє перебудові структури на молекулярному та надмолекулярному рівнях. Відповідно до [10], під дією вібрації відбувається зміщення кристалів ( $\Delta$ ) у литві.

$$\Delta = A\omega r_{\text{кр}}^2 [\rho_p - (\rho_t - \rho_p) \cos \omega t],$$

де  $r_{\text{кр}}$  – критичний розмір зародку кристалізації.

Накладення ультразвукового поля дозволяє отримувати здрібнену структуру та підвищувати фізико-механічні властивості полімерів [8]. Вплив УЗК виразиться, на наш погляд, у зміні щільності упаковки та орієнтації макромолекул, у зміні розмірів і кількості надмолекулярних утворень, у підвищенні ступеню кристалічності композицій, у епітаксії їх на границі розділу з наповнювачем та поверхнею ПК.

УЗК оказують величезну дію на процеси здрібнення макроструктури, мікрозерна, а також розсіяння домішок і різних включень в усьому об'ємі виробу. При цьому спільна дія УЗК та домішки ефективно впливають на ефективність здрібнення структури та підвищення фізико-механічних властивостей виробу.

Відомо, що на границі тверда частинка – розплав знаходиться нерухомий шар рідини, у якому перенесення речовини здійснюється лише шляхом дифузії. Порушення цього граничного шару в ультразвуковому полі внаслідок зриву розплаву кавітаційними бульбашками та найдрібнішими газовими бульбашками приводить до значного прискорення процесу обволікання розплавом домішки.

Процес дифузії у рідині виражається коефіцієнтом дифузії ( $D$ ).

$$D = \frac{\delta^2}{2\tau} e^{\frac{U}{kT}},$$

де  $\delta$  – товщина дифузійного шару;

$\tau$  – час;

$\delta$

– швидкість блукання частинок рідини;

$\tau$

$U$  – енергія активації процесу дифузії;

$T$  – температура розплаву.

Причиною прискорення дифузії при дії ультразвуку – звуковий тиск, який визиває турбулентне переміщення поблизу граничного шару та порушує його. З рівняння дифузії Фіка швидкість дифузії ( $d_m$ ) визначається:

$$d_m = -D \frac{c_t - c_0}{\delta} \Delta t,$$

де  $c_t$  і  $c_0$  – концентрація рідини;

$\Delta t$  – тривалість дифузії.

Усі ці спостереження показали, що специфічним фактором, який визиває прискорення дифузії є кавітація та звуковий тиск (60%). Решта 40% - це акустичні течії (14%) і нагрів розплаву в ультразвуковому полі (25%).

Великі розходження, що отримані різними дослідниками, при вивченні впливу УЗК на фізико-механічні властивості полімерних матеріалів можна пояснити тим, що ефективність ультразвукової дії є функцією інтенсивності коливань, амплітуди коливань, резонансної частоти, типу і властивостей озвучуваного матеріалу, обладнання для переробки пластмас, способу підведення УЗК, форми та розмірів зразків для дослідження, режимів нанесення тонкошарових покриттів тощо.

Аналізуючи акустичні характеристики та специфічні ефекти, що проходять у в'язко-текучих середовищах під дією ультразвуку, а також використовуючи узагальнену схему кристалізації в ультразвуковому полі [10] можна припустити, що на механічні, технологічні та експлуатаційні властивості відновлених деталей СПК окажуть великий вплив чинники, що відображені на (рис. 3).

На основі вищевикладеного припускається, що ультразвукова обробка СПК за аналогією з металами, сплавами, розчинами та розплавами полімерів дозволить значно підвищити експлуатаційні властивості КП при розробці технології відновлення ПК сільськогосподарських машин в ультразвуковому полі.

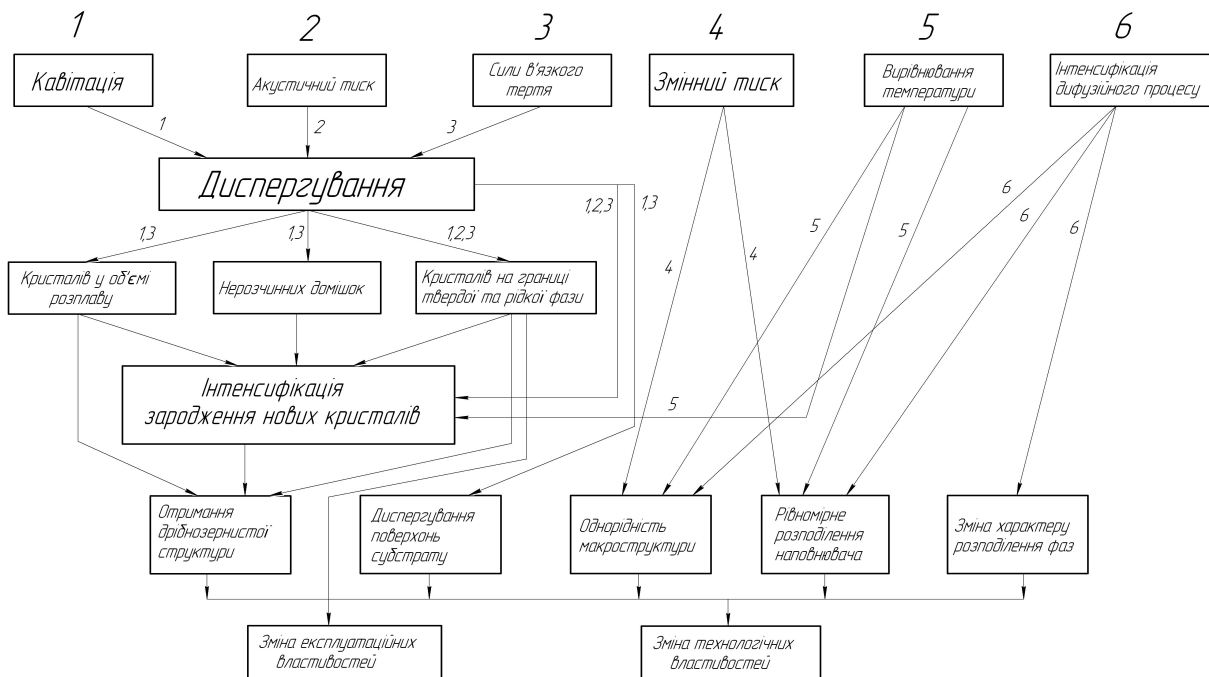


Рисунок 3 – Схема механізму ультразвукового впливу на розплави склонаповнених поліамідних композицій

## Список літератури

1. Ананьев В.В., Губанова М.И., Кириш И.А. и др. Модификация полиэтилена, инициированная ультразвуком // Пластические массы. – 2008. – №2. – С. 7-8.
2. Технология переработки пластмасс / Под ред. Н.И. Басова, В. Броя – М.: Химия, 1985. – 527 с.
3. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров – М.: Химия, 1974. – 392 с.
4. Москвитин Н.И. Склеивание полимеров. – М.: Лесная промышленность, 1968. – 304 с.
5. Гуль В.Е. Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. – М.: Высшая школа, 1972. – 320 с.
6. Басов Н.И., Любартович С.А., Любартович В.А. Виброформование полимеров. – Л.: Химия, 1979. = 159 с.
7. Фридман М.Л. Гуль В.Е. Интенсификация процесса экструзии пленок с помощью вибрационного воздействия // Пластические массы. – 1975. – №9. – С. 27-30.
8. Ультразвук: маленькая энциклопедия / Главн. ред. И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
9. Агранат Б.А. и др. Ультразвуковая технология. – М.: Металлургия, 1974. – 504 с.
10. Эскин Г.И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия. – М.: Металлургия, 1965. – 224 с.
11. Гуменюк В.С., Ягельский А.Н. Некоторые особенности микроструктуры стеклопластиков // Пластические массы. – 1970. – №6. – С. 52-54.
12. Кортен Х.Т. Разрушение армированных пластиков. – М.: Химия, 1967. – 166 с.
13. Розенберг Л.Д. Мощные ультразвуковые поля. – М.: Наука, 1968. – 266 с.
14. Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона – М.: Мир, 1973. – 543 с.
15. Чернышев И.А., Серковский В.А. Некоторые вопросы теории вибрирования сплавов // Изв. ВУЗов. – 1960. – №4. – С. 19.

16. Шияев А.С. Физические явления в расплавах вблизи температуры затвердевания в ультразвуковом поле // Пути совершенствования сельскохозяйственной техники. – Минск: Ураджай, 1974. – Вып. 26. – С. 85-91.
17. Раскин Е.Б., Брагинский В.А., Тризно М.С. Опыт интенсификации прессования стекловолоконных материалов с помощью ультразвука. – Л.: ЛДНТП, 1980. – 24 с.
18. Трофимов Н.Н., Пугачев С.И. Применение ультразвука в технологии создания адгезионных соединений. – Л.: ЛДНТП, 1979. – 20 с.
19. Абрамов О.В. Кристаллизация в ультразвуковом поле. М.: Металлургия, 1972. – 255 с.
20. Alfirevic I. Faktor koncentracije naprezannja u anisotropnim materijalima. – Strojarstvo, 1974. – Т.16. – S. 5-15.

*Ф. Василенко, И. Василенко, А. Бруцкий*

**Теоретические предпосылки восстановления подшипников скольжения полиамидными композициями с наложением ультразвуковых колебаний**

Приведены результаты теоретических исследований, направленных на использование ультразвуковых колебаний при восстановлении подшипников скольжения жаток уборочных машин тонкослойными покрытиями литьем под давлением стеклонаполненных полиамидных композиций

*F. Vasilenko, I. Vasilenko, A. Brutsky*

**Theoretical preconditions of restoration of bearings of sliding by polyamide compositions with imposing ultrasonic fluctuations**

Results of the theoretical researches directed on use of ultrasonic fluctuations at restoration of bearings of sliding of harvesters of harvesters тонкослойными by coverings by moulding under pressure стеклонаполненных of polyamide compositions are resulted

Одержано 28.05.10

**УДК 631.331.54**

**Ф.І. Василенко, проф., канд. техн. наук, В.В. Свяцький, канд. техн. наук, Л.П. Свяцька, інж.**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## **Проектування нестандартних ультразвукових випромінювачів**

Наведено розрахунок нестандартних магнітострикційних перетворювачів значної потужності для проведення експериментальних досліджень ультразвукового впливу на властивості виробів із полімерних матеріалів, які отримані литтям під тиском.

**полімер, ультразвук, випромінювач, розрахунок, магнітострикційний перетворювач**

Важливим резервом підвищення ефективності використання сільсько-господарської техніки, економії матеріальних і трудових ресурсів є виготовлення деталей і вузлів з матеріалів з необхідними фізико-механічними характеристиками, а також їхнє відновлення. Зазначене особливо важливе відносно посівних машин, так як польові роботи проводяться в короткі терміни з дотриманням жорстких агротехнічних вимог. За даними статистичних