

*С. М. ПОПОВ*, д-р філос. наук, проф., ЗНТУ, Запоріжжя

## **МОДЕЛЬ РОСТУ ЦЕНТРІВ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ПОДРІБНЕННІ ЗМІЦНЮЮЧОЇ ФАЗИ ТВЕРДИХ НАПЛАВЛЕНИХ СПЛАВІВ**

В статті подано теоретико-практичне дослідження дії ультразвукових коливань на наплавлений метал, розглянуто основні методи дії ультразвуку, які використовуються в сучасній практиці. Розроблено технологічний алгоритм та імітаційна модель ультразвукового впливу на кристалізацію наплавлених сплавів, при якому досягається ефект диспергування на стадії зародження кристалів твердої надлишкової фази, що забезпечує підвищенні міцнісні характеристики в комплексі з високою зносостійкістю сплаву.

**Ключові слова:** ультразвук, кавітація, зміцнююча фаза, дисперсність, структура, мікротвердість.

**Вступ.** Для зносостійких наплавлювальних сплавів характерна наявність у структурі великої кількості твердої фази, а саме: карбідів, боридів, силіцидів, силікокарбоборидів, інтерметалідів і інших. Притому розміри надлишкових зміцнюючих фаз знаходяться у діапазоні від 180 мкм до 40 мкм, і в подрібненому вигляді за рахунок легування модифікаторами близько 30-20 мкм [1]. Відомі методи модифікування сплавів рідкоземельними металами типу церій, ітрій і інші, які дозволяють подрібнити структуру металу, проте і цей ефект при використанні в гетерогенних зносостійких сплавах з великим змістом твердої фази не завжди дає позитивний ефект. Враховуючи той факт, що кількість зміцнюючої фази в гетерогенних сплавах досягає 80%, при агрегатній твердості 65-68 HRC, і діапазоні мікротвердості від 10 до 30 ГПА, стає очевидно, що ці матеріали мають підвищену крихкість, та за наявності навіть незначних ударних локальних вантажень можливі сколювання мікрооб'ємів металу з поверхні і зниження зносостійкості.

Тому, на нашу думку, легування чи модифікування як метод зміни та подрібнення структурно-фазового стану наплавлених сплавів практично себе вичерпав. Головним чином це пов'язано з тим, що одночасно високу зносостійкість та підвищену технологічність твердих наплавлювальних гетерогенних сплавів можливо отримати тільки за умов ультрадисперсного подрібнення надлишкових вкраплень карбідів, боридів та інших твердих хімічних сполук до розмірів 0,5-0,005 мкм [1]. Таким чином, проблема розробки технології та алгоритму ультрадисперсного подрібнення є актуальною на даний час а використання ультразвукових технологій дозволить підвищити однорідність структури разом з подрібненням структури наплавленого металу, що забезпечить підвищенні міцнісні характеристики і високу зносостійкість сплаву.

**Аналіз літературних даних.** В сучасній практиці дії ультразвуку на метал отримали розповсюдження наступні методи: ультразвукова ударна обробка, дія ультразвуку на метал, що кристалізується, і дія ультразвуку на метал в твердій фазі. Кожний з методів має свої переваги і недоліки, і вибір методу дії – складна задача, при вирішенні якої спеціаліст повинен чітко уявляти кінцеву мету.

Найбільш ефективна зміцнююча технологія – ультразвукова ударна обробка. Зразки для досліджень, технологія і технологічні варіанти УУО виготовлені

і розроблені в Северодвинську [2].

Позитивні результати показало використання УУО при обробці поверхні низьколегованої низьковуглецевої феритно-перлітної сталі 12Х1МФ. Ударна УЗО зварних з'єднань зі сталі 12Х1МФ призводила до зміни структури поверхні: в зоні основного металу

спостерігалось подрібнення зерен в 3-4 рази (рис. 1, а), в зоні зварного шва – подрібнення слабке (рис. 1, б), а в ЗТВ – утворення більш світлого поверхневого шару (рис. 1, в).

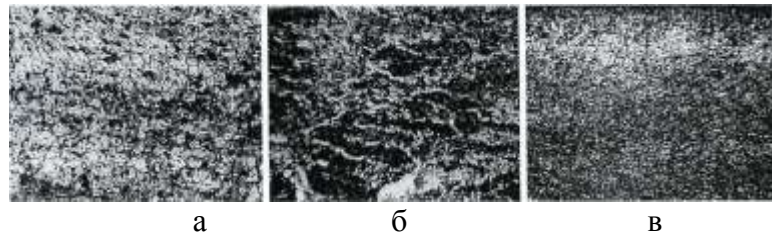


Рис. 1 – Мікроструктура поверхні зварного з'єднання сталі 12Х1МФ після УЗО  $\times 100$ : а - подрібнення зерен в 3-4 рази; б - подрібнення слабке; в - утворення більш світлого поверхневого шару

Ультразвукова обробка поверхні зварних з'єднань

сталі 12Х1МФ підвищує міцнісні характеристики на 2 – 3%, твердість поверхні – на 25-30%, циклічну довговічність зварного з'єднання – в 4-5 разів, а також границю повзучості основного металу [3]. Було встановлено, що при дії УЗК на структуру металу, що деформується, спостерігається два нелінійних ефекти: «акустичне знеміцнення» і «акустичне зміцнення» [4]. Автори роботи [6] вперше помітили зниження статичної напруги під дією УЗК, необхідного для здійснення пластичної деформації при розтяганні монокристалів цинку.

В роботі [6] були наведені цікаві спостереження відносно вмикання імпульсу УЗК. За даними роботи [7], для відпалених м'яких сталей (0,37% С) при дії на них циклічних навантажень величина межі плинності підвищується на 16-21%, а відносне звуження зменшується на 7-57%.

За даними робіт [8, 9], дія ультразвуку призводить до наступних змін структури: зменшенню середньої величини зерна; усуненню стовпчастої структури і утворенню рівноважного зерна; підвищенню однорідності зливка, зменшенню міри розвитку ліквідаційних процесів; більш рівномірному розподілу неметалічних включень за усім обсягом зливка.

**Мета роботи.** Нами було поставлено задачу розробити технологію ультразвукової дії у момент кристалізації наплавлених сплавів, при якій досягався б ефект ультразвукового диспергування на стадії зародження кристалів, що забезпечить отримання ультрадисперсного структурно-фазового стану який повинен одночасно мати підвищені міцнісні характеристики і високу зносостійкість сплаву.

**Матеріали дослідження.** В якості об'єкту для моделювання процесу кристалізації, в ході вивчення літературних даних, нами була обрана сила в'язкого тертя що виникає при дії ультразвуку. Вибір обґрунтовується тим, що з існуючих теорій найбільш вивчені дві: сили в'язкого тертя і кавітаційні явища, що викликані ультразвуком в розплаві. Аналогічно процесам, що протікають при зварюванні, раціонально в якості досліджуваного об'єкту обрати сили в'язкого тертя, оскільки явище кавітації пов'язано з утворенням бульбашки і подальшим її зхлопуванням, результатом якого є сферичні ударні хвилі з тиском на фронті хвилі в тисячі атмосфер і подрібнення ними зростаючих кристалів. Як згадувалося раніше, процес кавітації пов'язаний з наявністю великої кількості газових включень в розплаві, проте автори розглядають цей процес при кристалізації великого об'єму металу і тривалої дії на рідкий метал, що кристалізується. Процес наплавлення має значно

менший інтервал часу і об'єм ніж кристалізація металу у виливниці, тому явища кавітації пов'язані з ультразвуком матимуть менший ефект ніж в інших випадках, отже для моделювання візьмемо сили в'язкого тертя.

Розглянемо деякий об'єм розплаву, що обмежений кубом. Простір, що займає розплав, розбиваємо на комірки  $C_{i,j,k}$ ,  $i = \overline{1,n}$ ,  $j = \overline{1,n}$ ,  $k = \overline{1,n}$  розмір кожної того ж порядку, що і довжина границі найменшого кристалу в моделі  $h_0$ . Це дозволяє контролювати стан елементарних об'ємів  $dV$  розплаву.

$$V_{\text{розплаву}} = n^3 dV, \text{ або, з урахуванням } dV = h^3;$$

$$V_{\text{розплаву}} = n^3 h^3$$

Для спрощення моделі, задаємо такий масштаб, при якому верхівки куба, обмежуючого об'єм розплаву, що розглядається, мають координати  $A_1(1,1,1)$ ,  $A_2(-1,1,1)$ ,  $A_3(1,-1,1)$ ,  $A_4(1,1,-1)$ ,  $A_5(-1,-1,1)$ ,  $A_6(1,-1,-1)$ ,  $A_7(-1,1,-1)$ ,  $A_8(-1,-1,-1)$ . Об'єм такого куба:

$$V_{\text{куба}} = (1 - (-1))^3 = 8$$

Тоді будемо казати про умовні мікрометри, що відповідають цьому масштабу, для виміру розмірів кристалів.

$$K_l = \frac{V_{\text{куба}}}{V_c} = \frac{8}{V_c}$$

Обираємо такий масштаб  $K_t$  модельного часу відносно реального, який дозволить прораховувати новий стан моделі між подіями в ній. Наприклад, нам потрібний певний час для генерації нових кристалів, розрахунку взаємодій і для відображення тривимірної графічної інформації, і нарешті, потрібний час для побудови графіків.

Припустимо, кожний кристал, що є центром кристалізації, породжує навколо себе в середньому  $\bar{n}$  інших кристалів. Обчислимо їх координати, приблизно розглядаючи форму кристала як кулю радіусу  $r$ :

$$x = x_0 + r \sin \theta \cos \varphi,$$

$$y = y_0 + r \sin \theta \sin \varphi,$$

$$z = z_0 + r \cos \theta.$$

Це перетворення сферичних координат в декартові, які застосовуються в нашій моделі. Центр перетворення співпадає з центром кристала, таким чином, ми, задаючи азимутний і зенітний кути, можемо отримати координати центру нового кристала. Кожен кристал має математичний опис, який складається з трьох основних параметрів:

$$c_i = c(\vec{r}_i, h, A, \omega, \varphi_0^i, t),$$

де  $\vec{r}_i(x, y, z)$  – радіус-вектор, що задає декартові координати центру кристала в просторі,  $A, \omega$  і  $\varphi_0$  – визначають вимушені коливання кристала під дією ультразвуку, частота визначається характеристиками випромінювання, дія амплітуди ультразвукових коливань змінюється при віддаленні від джерела і є найбільшою в місці підведення ультразвукового випромінювача, але в межах даного мікрооб'єму досить постійна. Початкова фаза  $\varphi_0$  дозволяє враховувати в моделі ті обставини, коли кристали в момент кристалізації можуть рухатись не синхронно, що насамперед як раз пов'язано з дією сил в'язкого тертя між частками.

$t$  – час,

$$\vec{r}_i = \vec{r}(c_j, \vec{x}(A, \omega, \varphi_0, t)), \quad i = 1..m, j = 1..m, j \neq i,$$

де функція  $\vec{x}(A, \omega, \varphi_0, t)$  визначає зміщення в результаті вимушених коливань частки, а  $c_j$  описує стан інших кристалів.

Графіки залежності діаметру зерна від амплітуди ультразвукових коливань і кількості зерен і діаметру від часу кристалізації під дією УЗК наведені на рис. 2 та рис. 3 відповідно.

Модель реалізована як додаток на платформі Windows, з використанням бібліотеки OpenGL. Алгоритм запрограмован на мові «Сі шарп» сімейства мов «.NET». Існують дві основні графічні бібліотеки: «OpenGL» і «Microsoft DirectX», але оскільки перша – це бібліотека з відкритим початковим кодом, яка поширюється за ліцензією «GPL», це дозволило нам легально використати її безкоштовно. Обрана бібліотека має більшу гнучку комунікаційну придатність між платформами за рахунок більш високого ступеня абстрагування від устаткування, що також спрощує її використання для реалізації науково-практичних візуалізаційних проектів. Крім того, у бібліотеці містяться вбудовані інструменти для створення сценарію та роботи з текстурами. Для прискорення промальовування візуалізації нами було використано так звані «списки відображення» (англ. «Displaylists»), в яких зберігали дані про вершини поверхонь примітивів і векторів нормалей, що у подальшому дає можливість змінювати масштаб і положення при застосовуванні списку потрібного примітиву.

Для об'єднання платформи «.NET» і системної бібліотеки Open GL ми використали програмний блок фреймворк «Tao Framework», згідно ліцензії «GPL». Це обумовлено тим, що мова «Сішарп» дозволила нам швидко побудувати інфраструктуру моделі згідно з принципами об'єктно-орієнтованого програмування. Тому для компіляції, відлагодження і редагування коду програми для більшої зручності було використано середовище розробки «Microsoft Visual Studio 2008». Крім того, оскільки кожен кристал, є новим центром кристалізації і створює навколо себе переохолоджений об'єм металу, який обумовлює зародження нових кристалів з

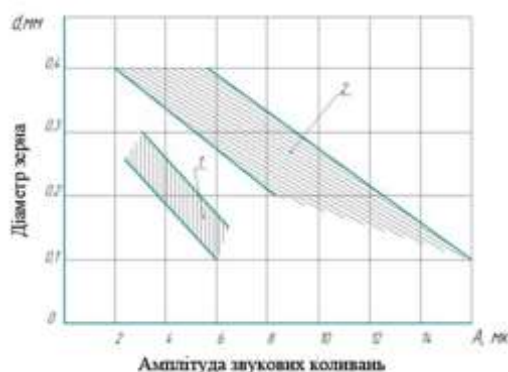


Рис. 2 – Залежність діаметру зерна від амплітуди звукових коливань при наплавленні середньолегованими сплавами (1) і високолегованими сплавами (2)

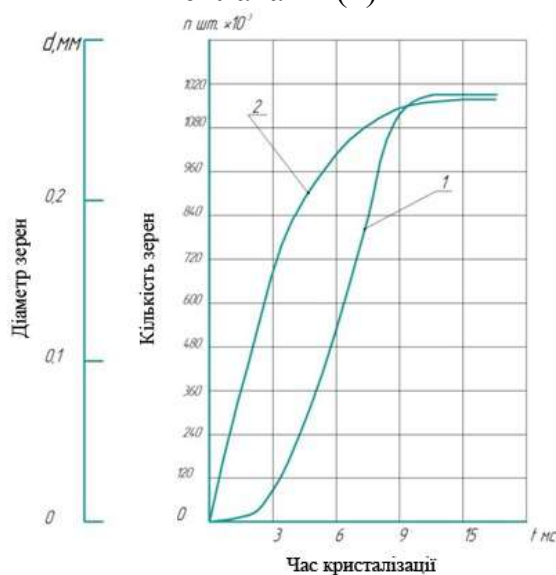


Рис. 3 – Залежність кількості зерен (1) і діаметру (2) від часу кристалізації під дією УЗК

подібними параметрами попередніх фаз, що вже знаходяться у стадії кристалізації нами було використано структуру даних «дерево».

Для динамічного відображення графіків залежностей, нами було розроблено клас діаграм «Chart», який реалізує методи перетворення математичних координат в екранні, містить засоби побудови декількох графіків в одній площині. Робота розробленої моделі реалізована за допомогою програми, алгоритм якої представлений на рис. 4. Спочатку відбувається ініціалізація бібліотеки OpenGL, яка взаємодіє з апаратним 3D прискорювачем відеокарти. Відбувається налаштування джерел світла, властивості матеріалів, параметри згладжування ліній.

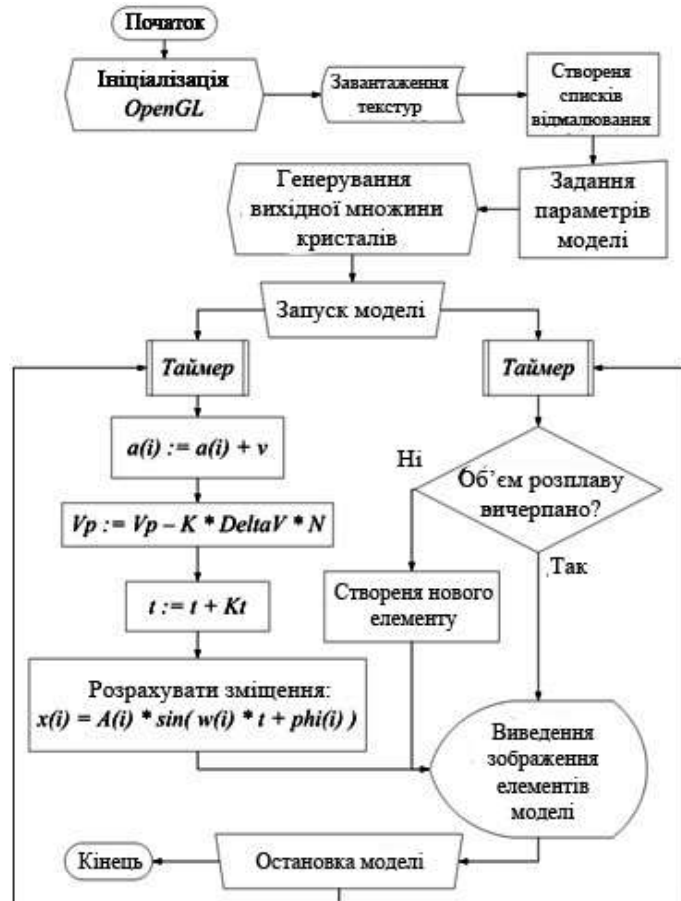


Рис. 4 – Алгоритм розробленої програми

Далі виконується

завантаження текстури, якою будуть покриті многогранники, що імітують зерна. Текстура має бути зображенням спеціального формату і після завантаження може зберігатися у відеопам'яті. Після чого, створюються списки відображення, які значно прискорюють промальовування великої кількості однотипних елементів, таких, як кристали в нашій моделі, які в прийнятому наближенні відрізняються тільки розміром, положенням в просторі і трьома кутами повороту. На наступному етапі користувач може відкоригувати параметри моделі, такі як інтервали спрацьовування таймера, масштаб часу, початкову кількість зерен і їх початковий розмір. Після того як зроблена ініціалізація, генерується задана кількість кристалів. Користувач натискає кнопку «Пуск» і в роботу включаються два таймери. Перший таймер спрацьовує кожні 66 умовних мілісекунд і оновлює параметри існуючих кристалів. Літерою  $a$  позначено діаметр кристалу. Діаметр  $i$ -го кристалу збільшується відповідно швидкості зросту  $v$ . Кристал при зростанні зменшує об'єм розплаву, предмета кристалізації  $V$ . Об'єм кристалізованого розплаву зменшується на стільки, на скільки збільшується сумарний об'єм кристалів. Далі збільшується час в моделі. Етапи розвитку процесу кристалізації в часі гетерогенних сплавів під дією УЗК в різні моменти часу наведено на рис. 5.

Після цього, на підставі закону вимушених гармонійних коливань розраховується зміщення кристалу відносно положення спокою.  $A(i)$  – амплітуда  $i$ -го кристалу, яка змінюється і залежить від віддалення від джерела ультразвуку;  $w(i)$  – частота коливань,  $phi(i)$  – початкова фаза, а  $t$  – це модельний час. Параметри розраховані і оновлені, тому в наступну чергу переходимо до блоку виведення зображення на екран. Тут виконується тривимірна візуалізація моделі, засобами



бібліотеки розраховується освітлення, виконується перетворення координат для відображення підрізними кутами огляду. Перевіряється, чи натиснув користувач на кнопку «Стоп», і, якщо цього не сталося, триває моделювання. Інший таймер спрацьовує раз в 1400 умовних мілісекунд. Після спрацьовування оцінюється об'єм вільного розплаву, якщо він не вичерпаний і є простір для зростання кристалів, то моделюється поява нових зерен шляхом створення нового елемента даних.

Властивості знову створеного кристала визначаються суміжними кристалами і початковими параметрами. Якщо розплав повністю кристалізувався, то виконується тільки перехід до виведення зображення. Для спрощення у блок-схемі не наведені операції по збору параметрів моделі і побудові графіків залежностей, а ці блоки містяться перед блоком виведення зображення.

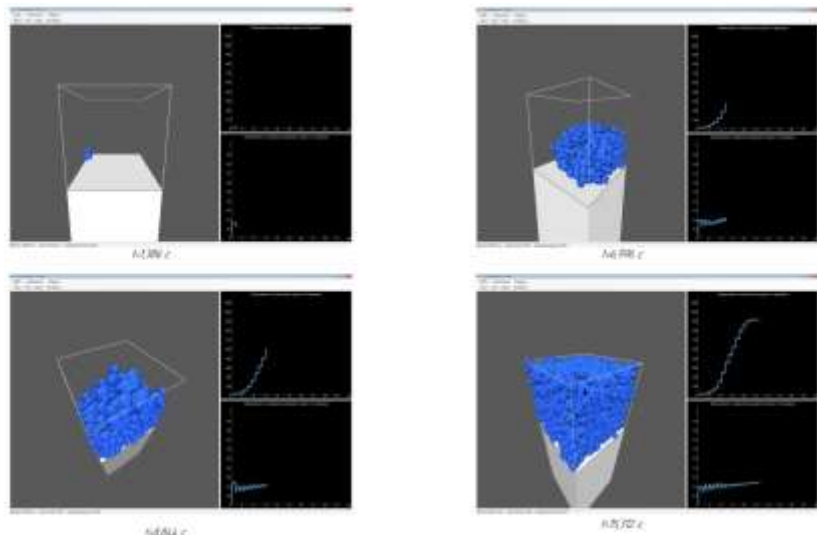


Рис. 5 – Етапи розвитку процесу кристалізації в часі гетерогенних сплавів під дією УЗК

**Висновки.** Розроблено алгоритм та реалізовано аналітично-імітаційну модель, що дозволяє прогнозувати структуру наплавленого металу під дією ультразвукових коливань. Створений програмний засіб як інструмент надає можливість відтворити процес кристалізації твердої надлишкової фази в часі та дозволяє відстежувати динаміку кількості кристалів і їх середній діаметр. Аналіз розробленої моделі дозволив встановити, що зміна кількості і діаметру зерен відбувається найбільш інтенсивно в початковий момент кристалізації, а за рахунок варіювання технологічних параметрів коливання середній діаметр подрібнених структурно-фазових складових може змінюватись у діапазоні 0,25-0,005 мкм. Тож, доведено принципову можливість того, що використання ультразвукових технологій дозволяє в наплавленому металі на стадії кристалізації підвищити однорідність структури разом з ультрадисперсним подрібненням твердих надлишкових вкраплень.

**Список літератури:** 1. Попов С. Н. Тріботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні [Текст] / С. Н. Попов, Д. А. Антонюк, Нетребко В. В. // Навчальний посібник. – Запоріжжя: ВАТ «Мотор Січ», 2010. – 368с. 2. Статников Е. Ш. Технология ультразвуковой ударной обработки как средство повышения надежности и долговечности сварных металлоконструкций / Е. Ш. Статников // Сварочное производство. – 2003. – №4. – С. 17-29. 3. Безбородов В. П. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и свойства сварных соединений теплостойкой стали 12Х1МФ / В.П. Безбородов // Сварочное производство. – 2000. – №7. – С. 17-21. 4. Кудрявцев Ю.Ф. Повышение циклической долговечности сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой / Ю. Ф. Кудрявцев, В. Ф. Коршунов, А. З. Кузьменко // Автоматическая сварка. – 1989. – № 7. – С. 24-28. 5. Пархимович Е. М. Сварка и наплавка в ультразвуковом поле / Е. М. Пархимович. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 207с. 6. Силин Л. Л. Ультразвуковая сварка. Соединение металлов в твердом состоянии и улучшение качества сварных швов / Л. Л. Силин. – М.: 1962. – 254с. 7. Ерохин А. А. Способы ввода ультразвуковых колебаний в сварочную ванну с целью повышения качества шва / А. А. Ерохин, Л. Л. Силин // Сварочное производство. – 1960. –

№5. – С. 4-7. **8.** Гуревич Я. Б., Леонтьев В. И., Теумин И. И. Влияние ультразвука на структуру и свойства стали / Я. Б. Гуревич, В. И. Леонтьев, И. И. Теумин // Сталь. – 1966. – №9. **9.** Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. проф. Л. Д. Розенберга. – М., 1970 – 685 с.

Надійшла до редколегії 01.06.2013

УДК 669.018.25:519.863

**Модель росту центрів кристалізації при ультразвуковому подрібненні зміцнюючої фази твердих наплавлених сплавів/ С. М. Попов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. - № 38 (1011). – С.15-21 . – Бібліогр.: 9 назв.**

В статье представлены теоретико-практические исследования действия ультразвуковых колебаний на наплавленный металл, рассмотрены основные методы воздействия ультразвука, которые используются в современной практике. Разработан технологический алгоритм и имитационная модель ультразвукового воздействия на кристаллизацию наплавленных сплавов, при котором достигается эффект диспергирования на стадии зарождения кристаллов твердой избыточной фазы и обеспечивает повышение прочностных характеристик в комплексе с высокой износостойкостью сплава.

**Ключевые слова:** ультразвук, кавитация, укрепляя фаза, дисперсность, структура, микротвердость.

The article describes the theoretical and practical study of ultrasonic vibrations on the weld metal, the basic methods of ultrasound used in modern practice. The technological algorithm and simulation model for ultrasound treatment on the crystallization of alloys deposited at which the effect of dispersion in their infancy excess phase of solid crystals, which provides increased strength characteristics in combination with high wear resistance of the alloy.

**Keywords:** ultrasound, cavitation, strengthening phase dispersion, structure, microhardness.

УДК 621.62

**С. В. ПОПОВ**, канд. техн. наук, доц., Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка;

**Т. О. СЕВЕРИН**, студентка, Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ ПЛОСКОГО ШЛІФУВАННЯ ПЕРИФЕРІЄЮ КРУГА

Розглянутий гідродинамічний тиск між шліфувальним кругом і оброблювальною поверхнею заготовки як показник, що характеризує теплодинамічні явища в зоні шліфування. Для різних умов обробки проаналізовано вказаний показник і запропонували найбільш придатні інструментальні матеріали для шліфування, які забезпечують належні параметри якості обробки металів різанням.

**Ключові слова:** шліфування, гідродинамічний тиск, швидкість протікання

**Вступ.** Шліфування є найбільш розповсюдженим методом кінцевої обробки. Висока геометрична точність, продуктивність, можливість отримання високоякісного поверхневого шару приводять до того, що обсяг шліфувальних операцій безперервно збільшується [1].

Розвиток шліфування, поява нових машинобудівних матеріалів і нових абразивних інструментів потребує більш глибоко вивчати фізичну суть цього процесу та дає можливість підвищувати продуктивність при одночасному

© С. В. ПОПОВ, Т. О. СЕВЕРИН, 2013

покращенні якості поверхневого шару. Показники якості поверхневого шару визначаються режимами обробки, характеристиками кругів, складом змащувально-