

Чому чай солодкий?

або про “смакові якості” чорного металу під дією низькочастотної вібрації

Відкрито принципово новий спосіб одержання дрібнозернистої й однорідної структури металевого зливка за рахунок віброобробки розплаву в процесі його застигання. При досягненні в розплаві порога кавітації настає лавиноподібний процес розмноження дрібнодисперсних центрів кристалізації, завдяки чому зливок набуває однорідної дрібнокристалічної структури



Микола Даньшин
доктор фіз.-мат. наук,
професор,
пров. наук. співр.
Інституту економіки
промисловості
НАН України,
м. Донецьк

Закономірність стрибкоподібної зміни фазового стану холоначого розплаву під впливом низькочастотної вібрації. Так називається відкриття донецьких учених — **О.М. Смирнова, В.Л. Пилюшенка, С.В. Момота, В.Н. Амітана**), зареєстроване на самому початку 2003 р. Експериментально було встановлено невідому раніше закономірність стрибкоподібної зміни фазового стану холоначого розплаву під впливом низькочастотної вібрації, що полягає в лавиноподібному зародженні центрів кристалізації при досягненні в розплаві кавітаційного порога.

Проте навіть таке розгорнуте подання суті відкриття мало що говорить людині, далекій від науки і практики металургійного виробництва. Думаю, що більшість читачів, пробігши очима лише перший абзац статті, переадресують свою увагу на пошук більш зрозумілої і менш нудної теми. Не кваптеся! Насправді не все так складно і нудно! Більш того — все просто і цікаво!

Міркуючи, як донести суть відкриття до кожного читача, згадав легенду середини минулого століття. Викладу її по пам'яті, а пов'язана вона з ім'ям видатного фізика-теоретика **Льва Ландау**. Якось до нього прийшли його аспіранти з несподіваним запитанням: **“Скажіть, Дау (так до нього зверталися в найближчому оточенні), чому чай солодкий**

— тому, що в нього кладуть цукор чи від перемішування ложечкою?” Метр сказав, що він знає відповідь на запитання, але йому дещо потрібно додумати і за остаточною відповіддю запропонував прийти лише наступного дня. Ранком він так відповів своїм учням: **“Звичайно, чай солодкий тому, що його перемішують ложечкою. Але мені до кінця не було зрозуміло, навіщо в нього кладуть цукор. А тепер я зрозумів: цукор кладуть для того, щоб було що перемішувати”**.

“Глибокий” філософський підтекст цієї байки (як у самому запитанні аспірантів, так і у відповіді їхнього вчителя) ясний: **чай солодкий тільки тоді, коли в нього кладуть і розмішують цукор**. Щодо цього, то кожен читач може вважати себе авторитетним експериментатором — йому, напевно, не раз приходилося переконаватися, що чай без цукру не буде солодким ні за яких обставин (скільки не перемішуй), але і без розмішування цукор осяде на дно склянки, не додавши чаю солодкості. Як не дивно на перший погляд, але ця “чайна історія” має наочний алегоричний зв'язок з явищами, що відбуваються в розплаві холоначого металу.

Однак, оскільки основна маса читачів усе-таки не металурги, а “фахівці з чаю”, то запропоную їм проєкспериментувати з цим загальнодоступним об'єктом дослідження, принаймні, на умоглядному рівні. Причому без цукру.

Отже, поки що Бог з ним, з цукром. Залишимо в склянці лише ложечку і почнемо розмішувати нею “порожній” чай (чи будь-яку іншу рідину). Але не обертальним, а поступальним періодичним рухом, переміщаючи ложечку від стінки до стінки склянки. У результаті такого перемішування швидкість руху ложечки буде періодично змінюватися не тільки по величині, але і по напрямку. А будь-яка зміна швидкості (згадаймо шкільний курс фізики) — є не що інше, як прискорення. Воно вимірюється в одиницях довжини, ділених на квадрат часу, наприклад, у м/сек². Це означає, що **інтенсивність процесу розмішування однозначно характеризується прискоренням руху рідини**. Запам'ятаємо цю важливу характеристику: саме в такій якості вона знадобиться нам для розуміння процесів, що відбуваються в металевому холоначому розплаві.

Які “інструменти” впливу на прискорення в нашому експерименті ми маємо? Вони очевидні — це частота періодичного руху ложечки f і його амплітуда A .

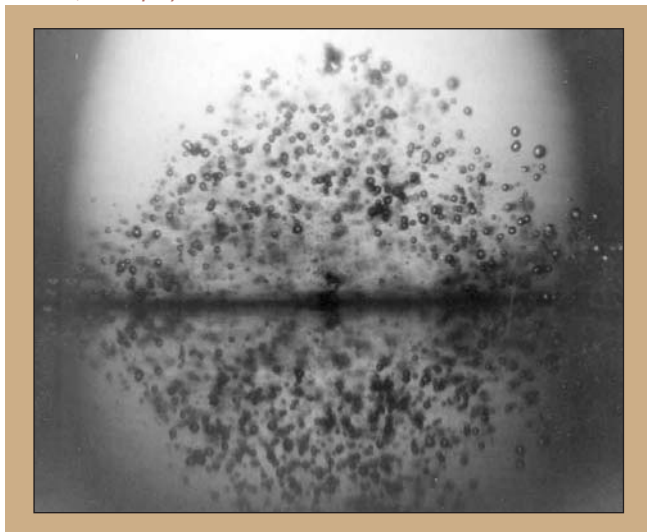
Як через ці величини виразити прискорення? Це можна зробити єдиним чином — перемноживши f^2 (1/сек²) на A (м). Саме такий добуток має розмірність прискорення — м/сек². Забігаючи наперед, скажу, що

врахування абсолютного значення добутку ($f^2 \cdot A$) відіграє ключову роль у розгадці явища лавиноподібного зародження центрів кристалізації в розплаві холонучого металу, що відкрився авторам.

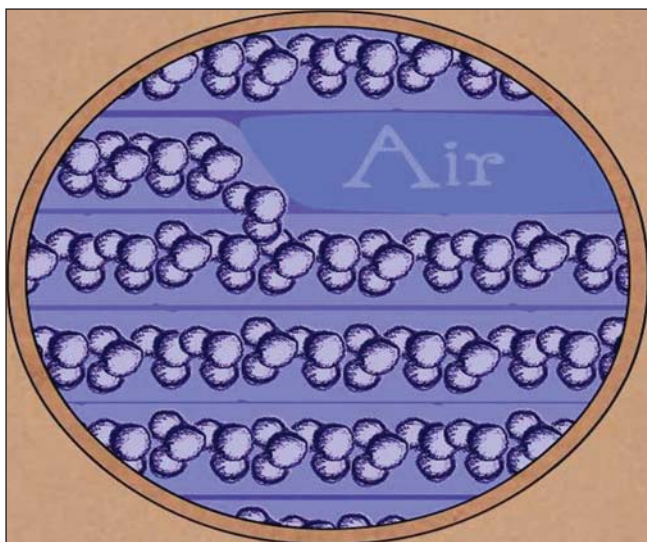
Виявляється, що при досягненні визначеної величини добутку ($f^2 \cdot A$) у рідині виникає фізичний ефект, що одержав назву **кавітація**.

Що це ще таке?

Продовжимо умовляний експеримент зі склянкою з рідиною. Можна представити (чи перевірити на досвіді), що при збільшенні частоти розмішування f (починаючи з деякої її величини) рідина перестане поспівати за ложечкою і в околі останньої з'являться порожнини у вигляді пухирців. Проте викликати цей ефект ложечкою не просто, тому що важко досягти частоти її коливань більше декількох *періодів у секунду* (Герц — Гц). Тому заберемо ложечку зі склянки і замінімо на деякий механічний вібратор з варіюваною частотою коливань, котрий надаватиме рідині періодичні напруги стиснення і розтягання. *Коли величина напруг розтягнення досягне визначеної величини, наступить ефект кавітації, який виражається в появі в рідині порожнин у вигляді тих же пухирців (чи, як їх ще називають, каверн).*



Фотографія кавітаційних пухирців, що виникли під дією акустичних сигналів, та схема процесу кавітації (виникнення каверн)



Але яке це має відношення до лавиноподібного утворення зародків у розплаві металу? Щоб відповісти на це запитання, варто було б продовжити наш "чайний" експеримент, остудивши рідину до температури, *нижчої від точки її замерзання (цей стан називається переохолодженням)*. Навряд чи хто-небудь навіть серед аматорів охолодженого чаю проробляв такий експеримент зі своїм напоєм. Зате автори відкриття провели сотні експериментів із усілякими переохолодженими рідинами: розплавами чавуну і сталі, модельної прозорої речовини — тіосульфату натрію, алюмінієвого сплаву та ін. Тому краще далі перейти від фантазування до реальних експериментів.

Отже, ефект кавітації настає після досягнення певної величини прискорення віброуючої рідини усередині її масиву. В земних умовах цей так званий поріг кавітації складає $0,25 \text{ м/сек}^2$. Таким чином, для початку і розвитку кавітаційних явищ в земних умовах необхідне досягнення порогу: $0,25 (f^2 \cdot A) \text{ м/сек}^2$.

Для досягнення бажаного ефекту від вібраційної обробки розплаву частоти коливань f звичайно вибираються в межах 0,5 — 50 Гц. При цьому достатні амплітуди коливань A складають частки міліметра.

Перш ніж пояснювати причини стрибкоподібного збільшення числа центрів кристалізації при віброобробці розплаву в режимі кавітації, варто вказати, яке значення має цей ефект для практики. А от яке. *Мрією металургів є створення кінцевого продукту з максимальною механічною однорідністю при мінімальному розмірі зерен кристалічної структури того чи іншого конструкційного матеріалу*. Від цього, у свою чергу, залежать такі важливі експлуатаційні характеристики, як межа міцності і твердості, корозійна стійкість і зносостійкість, мінімізація "утоми" відповідних конструкцій та ін.

Отже, відкритий авторами ефект є ідеальним способом здрібнювання зерна і підвищення фізичної однорідності матеріалу в порівнянні з традиційними способами досягнення цієї мети. У запропонованому ними способі крупнокристалічна структура, що виникає в процесі мимовільного затвердіння розплаву, може бути здрібнена в сотні разів при практично повному уникненні усадкових явищ і дефектів, триразовому збільшенні швидкості затвердіння зливка, підвищенні хімічної і фізичної однорідності у всьому його обсязі.

Але в чому все-таки полягає причина лавиноподібного розмноження центрів кристалізації, а в кінцевому рахунку — утворення дрібнозернистої структури остиглого зливка? Гіпотезу авторів спробую наочно пояснити за допомогою **рис. 1**. Але зазначу, що розплав попередньо повинен бути переохолодженим лише до рівноважної температури, коли ще не настає спонтанна кристалізація. А тепер — власне про механізм "розмноження". Це — найцікавіше!

У верхній частині **рис. 1** зображена зміна в часі t сила напруг P , порушуваних у масиві розплаву деяким зовнішнім механічним вібратором за один повний період коливань (на практиці використовуються саме гармонійні коливання, тобто змінні в часі за синусоїдальним законом). Нехай, наприклад, параметр P^- відповідає напругам, що розтягують, а параметр P^+ — стискаючим напругам. Під цим графіком показана динаміка розвитку кавітаційного ефекту в часі — у вигляді каверн, що появляються в розплаві (він умовно показаний як фонове заливання). Для простоти каверни зображені як перетини сфери, але насправді ці "порожнечі" можуть мати довільну тривимірну форму.

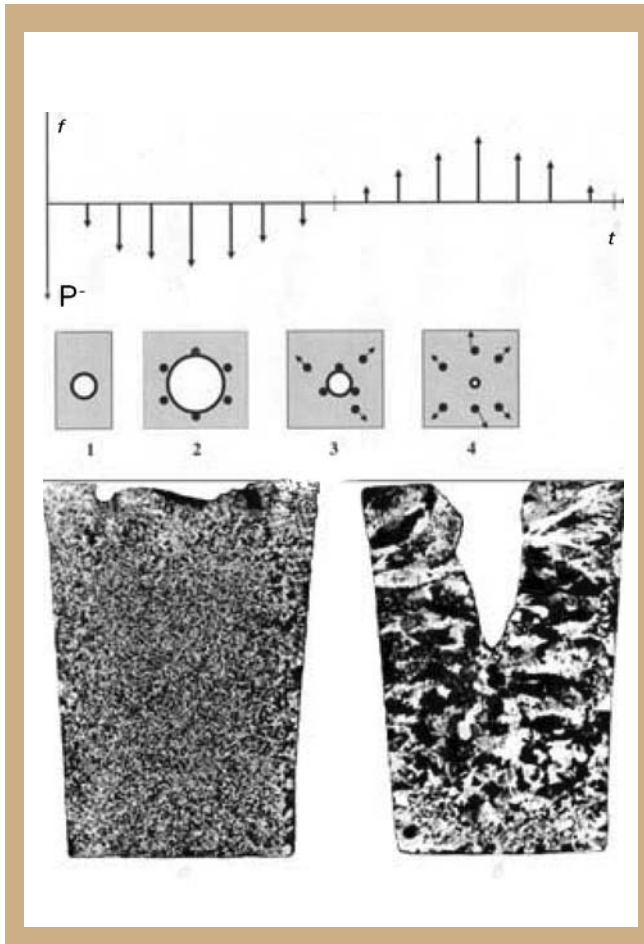


Рис. 1. Порущення поля напруг у розплаві з часом під дією вібратора за один повний період коливань (зверху); макроструктура алюмінієвих зливків після віброобробки (знизу)

Іхню еволюцію за повний період коливань умовно можна розбити на 4 характерні стадії, пронумеровані в центрі рисунка. Якщо в розплаві досягнуто порогу кавітації, то в момент часу, що відповідає стадії 1, під дією динамічних напруг розтягнення з'являється каверна. Вона згодом росте і досягає найбільшого розміру, коли розтягуюча деформація P^- стає максимальною (стадія 2). На цьому етапі рідина випаровується усередину каверни.

В результаті витрати енергії на це випаровування температура на периферії каверни знижується нижче рівноважної і на зовнішній поверхні каверни конденсуються дрібні зародки твердої фази. Вони умовно показані залитими кружками. Нехай, для визначеності, на каверні виникне, наприклад, 6 таких зародків. Далі розтягуюча напруга починає знижуватися до нуля (стадія 3), каверна, відповідно, зменшується в розмірі. А оскільки швидкість руху рідкої фази вища, ніж твердої, то зародки останньої починають відриватися від стінок каверни і дифундувати в масив розплаву. Нарешті, 4-й етап відповідає максимальній стискаючій напрузі P^+ . Вона приводить до різкого зменшення розмірів каверни чи навіть до її "лопання". Останнє можливе при деякому перевищенні порога кавітації. Під дією виникаючої при цьому ударної хвилі всі зародки будуть винесені в масив розплаву. На наступному періоді коливань P картина повториться в такій же послідовності.

Важко оцінити, скільки насправді утвориться зародків на одній каверні. Але це не так суттєво для розуміння явища. Важливо звернути увагу на інше: на своєрідну "ланцюгову реакцію" розмноження центрів конденсації твердої фази. Якщо на одній каверні, як ми припустили, їх утвориться 6, то при частоті коливань, наприклад 10 Гц, вона буде в секунду "вистрілювати" у масив металевого розплаву 60 зародків твердої фази. Під дією згаданих ударних хвиль вони, у свою чергу, будуть дробити на дрібні фрагменти своїх "побратимів", що надійшли в розплав раніше і встигли "розтовстіти", перетворившись у відносно великі кристали. А якщо ще врахувати незліченну кількість каверн, що виникають у результаті їхнього "вторинного" розмноження (дроблення) під дією тих же ударних хвиль, то лавиноподібність процесу наростання "хмари" твердої фази стає цілком очевидною.

Як ілюстрація результатів віброобробки на **рис. 1** (знизу) показана макроструктура алюмінієвих зливків, що затверділи за різних умов. З урахуванням вищесказаного, ці знімки шліфів говорять самі за себе і не вимагають додаткових коментарів.

Звичайно, наведений опис динаміки лавиноподібного процесу виникнення дрібнозернистої кристалічної фази не претендує на більше, ніж уясування читачем самої суті ефекту. А от що важливо насправді, так це блискуче підтвердження цього явища на практиці, переконливі позитивні результати віброобробки металевого розплаву в умовах реального виробництва.

Усяке відкриття в області прикладної науки мало що значить без його достовірної експериментальної перевірки і обрахованого економічного вигаду від використання закладених у ньому сподівань. Даному відкриттю повезло. У складі його авторського колективу персоналізовано представлені **усі компоненти успіху: експеримент, теорія, виробництво, математична обробка результатів, економічний розрахунок і, нарешті, фінансове забезпечення дослідно-промислових іспитів і впровадження.**

Це відкриття народилося, зрозуміло, не сьогодні і не вчора. Пріоритет його експериментального обґрунтування починається від 1989 року, а теоретичного підтвердження встановленої закономірності — від 2002 року. Відкриття пройшло перевірку в ряді ливарних цехів машинобудівних і сталеплавильних цехів металургійних заводів України і країн СНД. Ефективність його використання в умовах реального виробництва достатньо показати на прикладі Єнаківського металургійного заводу. Тут економічний ефект від віброобробки сталі в умовах конверторного цеху склав 23 грн на тунну металу за рахунок збільшення виходу, придатного в середньому на 2,8 %. Обробка протягом 2000—2002 років понад 235 тис. тонн сталі забезпечила економію в розмірі 5,2 млн грн!

На завершення, **повертаючись до "чайної" аналогії, можна зробити висновок, що і "смакові якості" продукції з чорного металу залежать не тільки від "цукру" (хімічних добавок, флюсів і т.д.), але і від своєрідного "перемішування", чим власне і є технологія вібраційної обробки розплаву.**

Сподіваюся, що мені вдалося відповісти на запитання, винесене в заголовок статті. Віброобробка аж ніяк не є альтернативою всім іншим методам надання і поліпшення експлуатаційних властивостей металопродукції. Вона їх лише доповнює, але в дуже важливому аспекті проблеми — підвищенні однорідності і дрібнозернистості структури зливка.