



УДК 621.745.56

Поступила 28.12.2015

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ CORRELATIONS CHARACTERISTICS OF THE STRUCTURE-SENSITIVE PROPERTIES OF LIQUID METALS

*В. Н. ЦУРКИН, Я. Ю. ДМИТРИШИНА, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев, Украина, пр. Октябрьский, 43а. E-mail: dpta@iipr.com.ua*

*V. N. TSURKIN, Ya. Yu. DMITRISHINA, Institute of pulse processes and technology National Academy of Sciences of Ukraine, Nikolaev city, Ukraine, 43a, Oktyabr'skiy str. E-mail: dpta@iipr.com.ua*

*Показана взаимообусловленность в соотношениях основных структурно-чувствительных свойств металлов и таких параметров атомарной и электронной структуры, как первое координационное число, заряд электрона и постоянная Больцмана.*

*The interconditionality of characteristics of major structure-sensitive properties of the liquid metals and the some parameters of electronic and atomic structure such as the first coordination number, electron charge and Boltzmann constant are displayed.*

**Ключевые слова.** Жидкие металлы, структурно-чувствительные свойства, структурные параметры, взаимосвязь, корреляция.

**Keywords.** Liquid metals, structure-sensitive properties, structural parameters, dimensionless coefficients, interrelations, correlation.

### Введение

Процессы, протекающие в металлическом расплаве в разных температурных интервалах, являются многопараметрическими и взаимообусловленными. В настоящее время накоплен большой объем экспериментальных данных по этой проблеме, показывающих некоторые закономерности процессов жидкого состояния металлов и сплавов, фазовых переходов и особенностей структурирования расплава, в том числе при прогнозировании технологических процессов литья. Чаще всего трактовка результатов эксперимента и постановка задач исследований жидкого состояния базируются на его модельных представлениях. Но именно сложность процессов в расплаве побуждает исследователей идти по пути решения определенных частных проблем, каждое из которых, к сожалению, не всегда адекватно поясняет причины и следствия изучаемых процессов и в рамках представлений структуры, и в рамках изучения свойств, и, тем более, с позиций их взаимосвязи. В этом плане показательна дискуссия о структурных превращениях в металлических расплавах в рамках разных модельных представлений жидкометаллической системы, используемых разными авторами [1–6]. В [1] особо подчеркивается важность изучения физических характеристик жидких металлов и сплавов в решении проблемы повышения качества и совершенствования технологий литейного производства. В [1–6] описание и объяснение структурных превращений, т. е. изменение в конфигурации ближнего порядка, проводилось на основе различных моделей жидкого состояния, которые в принципе преследовали по-своему одну цель – ответить на фундаментальные вопросы природы жидкометаллического состояния. Общим же для указанных работ является то, что результаты структурных исследований подтверждаются данными по исследованию свойств, совокупность которых и дает важную информацию о строении металлических расплавов. Более поздние, но разрозненные публикации, представляющие данные исследований структуры и свойств жидких металлов, также носят дискуссионный характер и также подчеркивают важный факт – свойства жидкого металла не проявляются автономно. Поэтому их описание логично строить в рамках системного подхода, который является качественно новым пониманием как во взаимосвязи свойств, так и во взаимосвязи

структуры и свойств [7–9]. Необходимо подчеркнуть, что наиболее эффективным подходом к формированию концепции управления качеством литого металла служит системный подход, основанный на методологии теории системного анализа [10].

В этом плане актуальными являются постановки задач, решение которых позволит показать взаимосвязь между термодинамическими, транспортными, акустическими и поверхностными свойствами жидких металлов. Такой подход позволит, в конечном итоге, описать и структурировать систему свойств расплава, которая может лечь, прежде всего, в основу принципов управления кристаллизационной способностью расплава.

*Цель работы* – на основе анализа размерностей построить корреляционные безразмерные комплексы структурно-чувствительных свойств жидких металлов.

### Постановка задачи

В данной работе ограничимся анализом только таких структурно-чувствительных свойств жидких металлов, как динамическая вязкость ( $\eta$ ), поверхностное натяжение ( $\sigma$ ), электропроводность ( $\gamma$ ), теплопроводность ( $\lambda$ ) и скорость звука ( $C$ ).

Выбор этих свойств обусловлен прежде всего упрощением многофакторной задачи. Но именно такое упрощение можно оправдать положениями работы [11], в которой Б. А. Баум подчеркивал трудности в выборе для анализа той или иной совокупности структурно-чувствительных свойств жидкого металла, но отдавая предпочтение приведенному выше их набору, хотя и при автономном их анализе. Кроме того, такой набор позволит в их корреляционных зависимостях показать взаимосвязь атомной и электронной подсистем структуры расплава. Именно на этих уровнях происходят элементарные процессы перестройки структуры и формирование величин физических свойств металлической жидкости [12], которые с учетом иерархии [9] без изменений проявляются в макрообъемах.

Как известно, коэффициенты переноса определяются электронной структурой расплава, а выделенные нами свойства, как правило, анализируются, в том числе, с помощью закономерностей теплового движения элементов металлической системы, которые в модельных представлениях термодинамики рассматриваются как ансамбли большого количества частиц. В этом случае целесообразно учесть такие фундаментальные константы, как постоянная Больцмана ( $k$ ) и заряд электрона ( $e$ ). Для привязки их к термодинамическим процессам необходимо учесть два термодинамических параметра, задающих состояние расплава: температуру ( $T$ ) и плотность ( $\rho$ ). Но, выбрав динамическую вязкость, мы априори заложили туда плотность ( $\rho$ ), связанную через кинематическую вязкость ( $\nu$ ):

$$\eta = \rho \nu. \quad (1)$$

Таким образом, мы имеем восемь физических величин ( $\eta$ ,  $\sigma$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $C$ ,  $T$ ,  $k$ ,  $e$ ), для которых по правилу размерности образуется совокупность пяти основных единиц системы СИ (кг, м, с, К, А). Значит, в соответствии с  $\pi$ -теоремой можно построить три нетривиальных безразмерных комплекса из указанных физических величин.

### Построение корреляционных соотношений

На определенную качественную корреляцию между  $\sigma$ ,  $\eta$  и  $C$  в металлических расплавах указано, например, в работах [13, 14]. В работе [15] с использованием теоретических и полуэмпирических аргументов показана взаимозависимость между скоростью звука, вязкостью, поверхностным натяжением и молярной массой, но не в едином комплексе, а в отдельных группировках. Для исследованной группы металлов разброс результатов составил от 0,7 до 2,3, что в принципе естественно для флуктуирующей атомарной и электронной подсистем жидкого металла.

Ранее в работе [16] с помощью анализа размерностей автором настоящей статьи получено корреляционное соотношение между  $\sigma$ ,  $\eta$  и  $C$  в виде

$$K_1 = \frac{C\eta}{\sigma Z_1}, \quad (2)$$

где  $Z_1$  – первое координационное число.

Учет в формуле (2)  $Z_1$ , важной термодинамической характеристики жидкометаллической системы, показывающей степень ближнего порядка, позволил привести значения  $K_1$  к единице для металлов от 11 порядкового номера до 83 с разбросом от 0,8 до 1,3.

Для анализа соотношений транспортных свойств металла ( $\gamma$  и  $\lambda$ ) обратимся к известному закону Видемана-Франца, в соответствии с которым

$$\frac{\lambda}{\gamma T} \sim \left(\frac{k}{e}\right)^2. \quad (3)$$

Для группы металлов, взятых для анализа из работы [16] и для которых показано соотношением (2), что  $K_1 \approx 1$ , выражение (3) также практически равно единице, если его представить в виде

$$K_2 = \frac{\lambda e^2}{\gamma T k^2 \sqrt{Z_1}}. \quad (4)$$

Что касается третьего безразмерного комплекса, то в соответствии с правилом размерности и уже полученных зависимостей (2) и (4), он имеет вид

$$K_3 = \frac{\lambda T}{\eta C^2 \sqrt{Z_1}}. \quad (5)$$

В таблице приведены результаты расчетов безразличных комплексов. Здесь данные по  $T_{пл}$ ,  $\gamma$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$ ,  $\eta$  взяты из работы [17], по  $Z_1$  – из работы [18], по  $C$  – из работы [19].

### Анализ результатов

Данные таблицы показывают приемлемую корреляцию анализируемых структурно-чувствительных свойств для широкого диапазона жидких металлов при температуре плавления. При этом полученные безразмерные комплексы  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  практически равны единице, это косвенно указывает на то, что они не зависят от молярной массы металла.

**Структурно-чувствительные характеристики жидких металлов и их соотношения**

Металл	Порядковый номер	$T_0$ , К	Электропроводность $\gamma$ , $10^6$ (Ом·м) <sup>-1</sup>	Поверхностное натяжение $\sigma$ , $10^{-3}$ Н/м	Скорость звука $C$ , м/с	Теплопроводность $\lambda$ , Вт·(м·К) <sup>-1</sup>	Вязкость $\eta$ , $10^{-3}$ Н·с·м <sup>-2</sup>	$Z_1$	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Na	11	371	10,37	195	2570	89,7	0,68	9,0	1,0	0,8	2,2
Al	13	932	4,12	914	4702	94,03	1,13	9,8	0,8	1,1	1,0
K	19	336	7,33	111	1880	21	4,64	9,0	1,0	1,0	3,2
Cu	29	1357	5	1285	3460	165,6	4,0	9,4	1,0	1,0	1,6
Zn	30	693	2,67	782	2827	49,5	2,82	10	1,3	1,1	0,6
Ga	31	303	3,85	718	2872	25,5	1,7	8,0	1,1	1,0	0,4
Rb	37	312	4,38	83	1260	29,3	0,67	9,5	1,1	1,1	3,0
Ag	47	1234	5,8	903	2750	174,8	3,52	10	1,1	1,0	2,2
In	49	430	3,1	556	2215	42	1,89	8,5	0,9	1,3	0,8
Sn	50	505	2,12	544	2425	30	1,85	8,3	1,0	1,3	0,6
Sb	51	903	0,88	367	1942	21,8	1,22	6,3	1,0	1,4	1,6
Cs	55	302	2,7	69	967	19,7	0,53	9,0	1,0	1,5	2,9
Tl	81	577	1,37	464	1660	24,6	2,64	8,0	1,1	1,5	0,8
Bi	83	544	0,78	378	1800	17,1	1,58	8,0	1,0	1,8	0,7
Среднее		–	–	–	–	–	–	–	1,0	1,1	1,2

Некоторые отклонения значений  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  от единицы для некоторых металлов можно пояснить прежде всего тем, что табличные значения свойств зависят от метода измерений. Кроме того, сами анализируемые свойства, как структурно-чувствительные, зависят от подвижности элементов системы и представляются в сводных таблицах как средние значения, т. е. с точностью до флуктуаций. Заметим, что уровень флуктуаций только  $Z_1$ , по данным работы [17], составляет величину от 10 до 20%. Если же взять за основу средние значения  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  по всему набору металлов, то их отличие от 1, как видим из таблицы, не превышает 20%. Каждое значение  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  получено с помощью хорошо проверенных экспериментальных данных и каждое из них или практически равно единице или не существенно отличается от единицы (за редким исключением). Это определенным образом подтверждает адекватность и универсальность представленных корреляционных соотношений. Конечно же, более весомые аргументы в пользу последнего могут быть получены или из первопринципов, или по результатам соответствующих многофакторных измерений.

Рассмотрим некоторые следствия, которые можно показать из соотношений (2), (4), (5). Прежде всего отметим, что именно присутствие в этих формулах первого координационного числа  $Z_1$  позволило привести их к одинаковому значению, равному практически единице. Это также указывает на то, что величины свойств коррелируют одинаково для металлов не только между собой, но и с  $Z_1$ . Кроме того,  $Z_1$  в знаменателе формул может указывать на то, что безразмерные комплексы приобретают признак универсальности, если их отнести к некоторой элементарной ячейке атомарной структуры, которой является первая координационная сфера. Здесь можно предложить гипотезу, в соответствии с которой система свойств проявляется в жидких металлах через кооперативные взаимодействия частиц первой координационной сферы. О подобных взаимодействиях, например, логично сделать вывод из работ [20–22].

Далее учтем соотношение (1) и перепишем формулы (2) и (5) в виде

$$K_1^* = \frac{\rho C v}{\sigma Z_1}, \quad (6)$$

$$K_3^* = \frac{\lambda T}{\rho C^2 v \sqrt{Z_1}}. \quad (7)$$

Эти соотношения позволяют показать такие следствия.

В формуле (6)  $\rho C$  в рамках представлений механики сплошных сред определяет сопротивление среды изменению ее состояния,  $\sigma$  – термодинамическая характеристика поверхности раздела фаз, мера некомпенсированности межчастичных сил в межфазном слое или излишек свободной энергии в поверхностном слое в сравнении со свободной энергией в объеме фазы. Вязкость  $v$  определяет диссипацию энергии при деформировании среды.

В формуле (7)  $\lambda T$  можно представить как характеристику передачи теплоты. При этом  $\rho C^2$  – это объемная плотность внутренней энергии среды. Причем и здесь их соотношение с вязкостью учитывает диссипацию энергии при деформировании среды. Важным следствием закона Видемана-Франца (3) является то, что он поясняет через соотношение транспортных свойств термоэлектрические явления в металле, а именно, при наличии градиента температуры (или точнее химического потенциала) в нем возникает электрический ток. Добавка в соотношение (3)  $Z_1$  также указывает на кооперативные процессы, реализующие транспортные свойства, через межчастичные взаимодействия в первой координационной сфере.

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в технологиях литейного производства в понимании механизмов, обеспечивающих подготовку расплава к кристаллизации, некоторые моменты этих сложных явлений могут быть дополнительно обеспечены или спрогнозированы с помощью системы свойств (2), (4), (5). Конечно же, очевидное упрощение модели жидкого сплава до чистого металла в жидком состоянии не совсем корректно. Но, как подчеркивалось, например, в работе [11], все процессы, протекающие в расплаве, связаны с подвижностью атомов и определяются в большей мере энергией и силами их связи, чем составом. Поэтому результаты, полученные на модельном расплаве чистого металла, могут показать, например, качественные изменения в соотношении свойств в сплаве на основе этого металла при его обработке.

### Выводы

1. Полученные в работе корреляционные комплексы структурно-чувствительных свойств жидких металлов имеют для них с учетом первого координационного числа практически одинаковое значение – единицу. Это косвенным образом свидетельствует об их универсальности.

2. Для процессов, характеризуемых структурно-чувствительными свойствами металлической жидкости, рационально анализировать не единичные межчастичные взаимодействия, но и кооперативные явления этих процессов, учитываемые первой координационной сферой.

3. Можно спрогнозировать, что любые изменения состояния жидкометаллической системы приведут к кооперативному изменению свойств в соответствии с их корреляционными соотношениями  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , представляющими собой систему структурно-чувствительных свойств.

### Литература

1. Островский О. И., Григорян В. А. О структурных превращениях в металлических расплавах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 5. С. 1–12.
2. Клименко Е. А., Баум Б. А. О возможности скачкообразных изменений структуры расплава железа // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 5. С. 12–17.

3. Ивахненко И. С. Особенности строения металлических расплавов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 5. С. 17–23.
4. Дутчак Я. И., Дутчак З. А. Электронная структура и превращения в расплавах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 5. С. 23–28.
5. Базин Ю. А., Замятин В. М., Насийров Я. А., Емельянов А. В. О структурных превращениях в жидком алюминии // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 5. С. 28–33.
6. Попель П. С. Фазовый переход или распад метастабильных агрегатов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 5. С. 34–41.
7. Самойлович Ю. А. Системный анализ кристаллизации слитка. Киев: Наукова думка, 1983. 248 с.
8. Цуркин В. Н. Принципы системного анализа к выбору методов внепечной обработки расплава // Металл и литье Украины. 2009. № 7–8. С. 12–16.
9. Гуляев Б. Б., Пряхин Е. И., Колокольцев В. М. Иерархия структур и механические свойства литой стали // Литейное производство. 1986. № 10. С. 9–12.
10. Цуркин В. Н. Комплексное управление качеством литого металла // Металл и литье Украины. 2008. № 9. С. 20–23.
11. Баум Б. А. Металлические жидкости. М.: Наука, 1979, 120 с.
12. Цуркин В. Н. Влияние системы структуры металлического расплава на его физические свойства // Вісник Українського матеріалознавчого товариства. 2011. № 4. С. 11–19.
13. Сумм Б. Д. Новые корреляции поверхностного натяжения с объемными свойствами жидкости // Вестн. Московского университета. Сер. 2. Химия. 1999. Т. 40. № 6. С. 400–405.
14. Регель А. Р., Глазов В. М. Закономерности формирования структуры электронных расплавов. М.: Наука, 1982, 320 с.
15. Alonso J. A., March N. H. Relation between transport and thermodynamic properties in liquid sp-electron metal near freezing // Phys. Rev. 1999. E. 60. P. 4125.
16. Цуркин В. Н. Соотношение первого корреляционного числа, вязкости, поверхностного натяжения и скорости звука в расплавах чистых металлов // Процессы литья. 2006. № 2. С. 14–19.
17. Смитлз Дж. К. Металлы. М.: Металлургия, 1980. 447 с.
18. Арсентьев П. П., Коледов Л. А. Металлические расплавы и их свойства. М.: Металлургия, 1976. 376 с.
19. Таблицы физических величин: Спр. / Под ред. И. К. Киикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
20. Чудинов В. Г. Кооперативный механизм самодиффузии в металлах // ЖТФ. 2000. Т. 70, № 7. С. 133–135.
21. Сирота Н. Н. Энергия связи, фононные спектры и термодинамические свойства элементов со структурами A1, A2, A3, A4 – Al, Cu, V, Ti, Mg, Si, Sn // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. № 9. С. 1674–1679.
22. Василиу Е. В. Трехионные взаимодействия и структура жидких металлов // Тр. Одесского политехнического университета. 2001. № 1. С. 35–42.

## References

1. Ostrovskij O. I., Grigorjan V. A. O strukturnyh prevrashhenijah v metallicheskih rasplavah [Structural transformations in metal melts]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija = Math. Universities. Ferrous metallurgy*, 1985, no. 5, pp. 1–12.
2. Klimentko E. A., Baum B. A. O vozmozhnosti skachkoobraznyh izmenenij struktury rasplava zheleza [The possibility of sudden changes in the structure of the molten iron]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija = Math. Universities. Ferrous metallurgy*, 1985, no. 5, pp. 12–17.
3. Ivahnenko I. S. Osobennosti stroenija metallicheskih rasplavov [Features of the structure of metal melts] *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija – Math. Universities. Ferrous metallurgy*, 1985, no. 5, pp. 17–23.
4. Dutchak J. A. I., Dutchak Z. A. Elektronnaja struktura i prevrashhenija v rasplavah [Electronic structure and the transformations in melts]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija = Math. Universities. Ferrous metallurgy*, 1985, no. 5, pp. 23–28.
5. Bazin Ju. A., Zamjatin V. M., Nasijrov Ja. A., Emej'janov A. V. O strukturnyh prevrashhenijah v zhidkom aljuminii [Structural transformations in liquid aluminum]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija = Math. Universities. Ferrous metallurgy*, 1985, no. 5, pp. 28–33.
6. Popel' P. S. Fazovyj perehod ili raspad metastabil'nyh agregatov [The phase transition or decay of metastable aggregates]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija = Math. Universities. Ferrous metallurgy*, 1985, no. 5, pp. 34–41.
7. Samojlovich Ju. A. Sistemyj analiz kristallizacii slitka [System analysis of ingot crystallization]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983. 248 p.
8. Tsurkin V. N. Principy sistemnogo analiza k vyboru metodov vnepechnoj obrabotki rasplava [The principles of the system analysis to choice of methods secondary treatment of the melt]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2009, no. 7–8, pp. 12–16.
9. Guljaev B. B., Prjahin E. I., Kolokol'cev V. M. Ierarhija struktur i mehanicheskie svojstva litoj stali [The hierarchy of structures and mechanical properties of cast steel]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1986, no. 10, pp. 9–12.
10. Tsurkin V. N. Kompleksnoe upravlenie kachestvom litogo metalla [Complex management of quality of cast metal]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*. 2008, no. 9, pp. 20–23.
11. Baum B. A. *Metallicheskie zhidkosti* [Metal liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 120 p.
12. Tsurkin V. N. Vlijanie sistemy struktury metallicheskogo rasplava na ego fizicheskie svojstva [Effect of system structure of metall melt on physical properties]. *Visnik Ukraїns'kogo materialoznavchogo tovaristva = Ukrainian Materials Research Society Bulletin*, 2011, no. 4, pp. 11–19.
13. Summ B. D. Novye korrelyacii poverhnostnogo natjazhenija s ob#emnymi svojstvami zhidkosti [New correlation of surface tension properties of the liquid bulk]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 2. Himija = Moscow University. Ser. 2. Chemistry*, 1999, vol. 40, no. 6, pp. 400–405.
14. Regel' A. R., Glazov V. M. *Zakonomernosti formirovanija struktury jelektronnyh rasplavov* [Laws of formation of structure of electronic melts]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 320 p.



15. Alonso J. A., March N. H. Relation between transport and thermodynamic properties in liquid sp-electron metal near freezing. *Phys. Rev. E*. 60, 4125 (1999).
16. Tsurkin V. N. Sootnoshenie pervogo korreljacionnogo chisla, vjazkosti, poverhnostnogo natjazhenija i skorosti zvuka v rasplavah chistyh metallov [The ratio of the first correlation number, viscosity, surface tension and the speed of sound in the pure molten metal]. *Processy lit'ja = Casting processes*, 2006, no. 2, pp. 14–19.
17. Smiltz Dzh. K. *Metally* [Metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980, 447 p.
18. Arsent'ev P. P., Kolodov L. A. *Metallicheskie rasplavy i ih svojstva* [Metal melts and its properties]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 376 p.
19. Tablitsy fizicheskikh velichin: *Spravochnik* [Tables of physical quantities: Directory]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976, 1008 p.
20. Chudinov V. G. Kooperativnyj mehanizm samodiffuzii v metallah [Co-operative mechanism of self-diffusion in metals]. *Zhurnal Technicheskoy Fiziki = Technical Physics*, 2000, vol. 70, no. 7, pp. 133–135.
21. Sirota N. N. Jenergija svjazi, fononnye spektry i termodinamicheskie svojstva jelementov so strukturami A1, A2, A3, A4 – Al, Cu, V, Ti, Mg, Si, Sn [Binding energy phonon spectra and thermodynamic properties of the components with the structures of A1, A2, A3, A4 – Al, Cu, V, Ti, Mg, Si, Sn]. *Fizika tverdogo tela = Solid state physics*, 2001, vol. 43, no. 9, pp. 1674–1679.
22. Vasiliu E. V. Trehionnye vzaimodejstvija i struktura zhidkih metallov [Three ionic interactions and structure of liquid metals]. *Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta = Proceedings of the Odessa Polytechnic University*, 2001, no. 1, pp. 35–42.

# 12-та міжнародна спеціалізована ВИСТАВКА ЛИТВО






## 24 - 26 травня 2016



КЛЮЧОВА ПОДІЯ ВИСТАВКИ

### ● XII Міжнародна конференція «Литво. Металургія 2016»

**Організатори:**

-  Запорізька торгово-промислова палата
-  Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України
-  Асоціація ливарників України
-  Національний університет «Харківський політехнічний інститут»
-  Національна металургійна академія України

ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР  
**КОСАК**  
ПАЛАЦ

**Запоріжжя**

[www.expo.zp.ua](http://www.expo.zp.ua)

Контакти Запорізька торгово-промислова палата | тел.: +38 (061) 213-50-26 | [expo2@cci.zp.ua](mailto:expo2@cci.zp.ua)