

03;05.1;05.3;12

## САМООРГАНИЗАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА ПРИ ЕГО ТУРБУЛЕНТНОМ ЭЛЕКТРОВИХРЕВОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ

© А.В.Никитин

Известен ряд методов улучшения физико-химических характеристик металлических и полупроводниковых материалов: глубокая химическая очистка, растворная перекристаллизация, зонная плавка и т. д. Применительно к металлам и металлическим сплавам, с целью резкого повышения их эксплуатационных физико-механических параметров, практикуются такие приемы, как вакуумно-дуговой переплав, электрошлаковый переплав [1], переплав с электромагнитным перемешиванием [2] и т. п. Поскольку в упомянутых случаях имеют дело со значительными скоростями конвективных потоков и градиентами температур (часто с заведомым превышением критических значений чисел Рейнольдса  $Re$ , Нуссельта  $Nu$  и Рэлея  $Ra$  [1-4]), то естественно ожидать от указанных процессов возможности генерации в их ходе диссипативных (самоорганизующихся) структур, например типа динамических ячеек Бенара [5]. "Замораживая" последние (посредством закалки расплава быстрым охлаждением) можно попытаться сформировать метастабильную в нормальных условиях надатомную ячеистую структуру, которая в пределе (при достаточном уменьшении размера ячеек) по аналогии с поликристаллическими нанокристаллами обладала бы принципиально

улучшенными, уникальными физико-механическими параметрами [6]. В приведенном логическом построении “замороженное” ядро турбулентного микровихря играет роль как бы единичного зерна нанокристалла, а межъячейковые поверхностные слои должны обладать сверхпрочностью особой плотной атомной упаковки, поскольку при их формировании по закону Бернулли могут действовать сверхвысокие давления — вплоть до кавитационных эффектов. Другая аналогия такого материала — полученные методом спекания (под давлением) сверхтвердые композиты, например типа твердого “сплава” ВК-6 и т. п.

Вследствие повышенной вязкости, теплоемкости и больших скоростей выделения теплоты затвердевания (кристаллизации) именно металлические расплавы являются наиболее благоприятными объектами реализации диссипативных ячеистых структур. Эти расплавы обеспечивают быстрое достижение критических значений градиентов температур (тем самым — критических значений  $Ra$ ), определяющих переход от ламинарного режима конвекции в турбулентный, с формированием ячеек Бенара [5]. Вместе с тем в толстых слоях расплава диссипативные структуры обычно не наблюдаются, поскольку горизонтальный размер  $d$  бенаровских ячеек, согласно теории Рэлея, связан с толщиной слоя  $h$  соотношением [5,7,8]

$$d = h\sqrt{2}. \quad (1)$$

С другой стороны, в процессе затвердевания расплава роль бенаровского слоя может играть жидкий пограничный слой, обладающий особыми свойствами по отношению к объему расплава (кинематическая вязкость, температура) [9]. Как подтверждение, красивые примеры ячеистого фронта кристаллизации при затвердевании металлического расплава приведены в работах [7,8]. Но при этом бенаровская “шестигранность” ячеек пропадает. И вообще, этот эффект нельзя однозначно трактовать как бенаровский в строгом смысле, с гораздо большим основанием его можно считать эффектом Маронгони [8], который определяется различием коэффициентов диффузии ( $D_1, D_2$ ) и кинематических вязкостей ( $\nu_1, \nu_2$ ) двух соприкасающихся жидкостей (одна из них — пограничный слой, другая — основной объем расплава), при выполнении критерия Стирлинга [5]

$$D_1/D_2 < 1 < \nu_1/\nu_2. \quad (2)$$

С целью достижения гидродинамической неустойчивости и образования “ячеистых” диссипативных структур, не

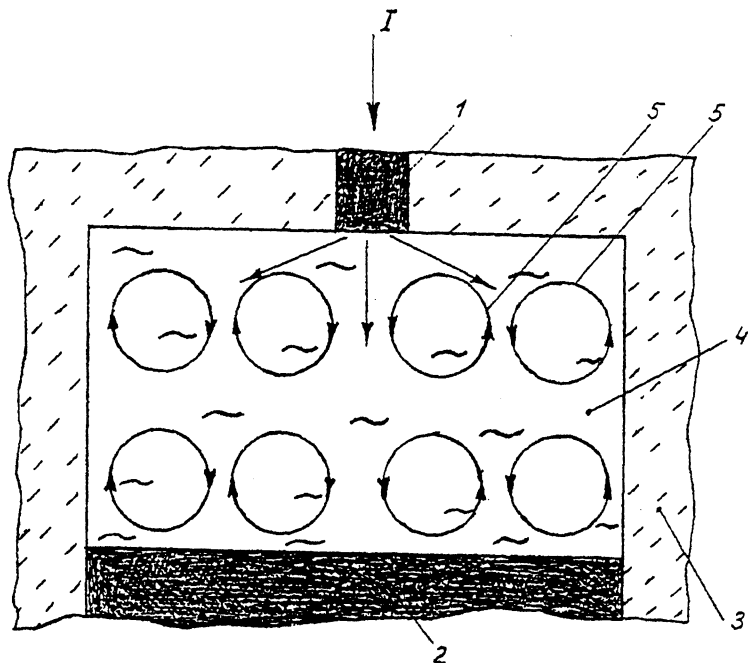


Рис. 1. Схема реализации диссипативных вихревых структур в расплаве металла: 1 — точечный электрод; 2 — сплошной электрод (материал — тантал); 3 — изолятор; 4 — расплав металла; 5 — символическое изображение турбулентных вихрей. Стрелками у точечного электрода условно изображены направления расходящихся трубок электрического тока.

связанных с эффектами Бенара и Маронгони [5], нами были использованы так называемые электровихревые течения [1]. Явления конвекции, согласно [1,3,5], по принципу действия сил Лоренца, поперечных вектору скорости, могут возникать при взаимодействии электрического тока (постоянного или переменного, безразлично) даже с собственным магнитным полем. Главное условие — пространственная неоднородность тока, которую можно обеспечить квазиточечностью одного из электродов (рис. 1). Скорость конвективного движения  $v^*$  на вертикальной оси симметрии вблизи “точечного” электрода определяется выражением [1]

$$v^* = \alpha \cdot \nu \cdot \sqrt{S}/L, \quad (3)$$

где  $L = d_1/2$  ( $d_1$  — диаметр сплошного электрода);  $\nu$  — кинематическая вязкость расплава;  $\alpha \approx 0.5$  при  $d_2/d_1 \leq 0.2$  ( $d_2$  — диаметр точечного электрода);  $S = \mu_0 I^2 / \rho \nu^2$  — безразмерный критерий электровихревых течений;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м

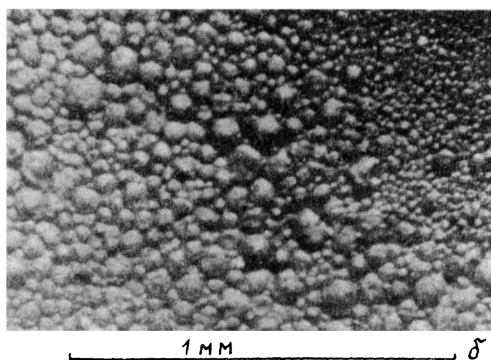
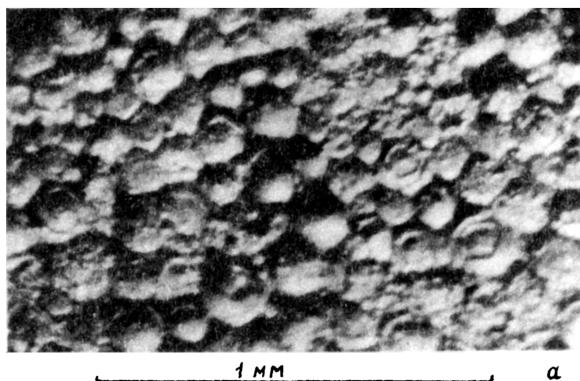


Рис. 2. Ячеистая структура металла (разлом) после закалки перемешиваемого расплава: а — сила тока 1000 А; б — сила тока 1400 А.

(магнитная проницаемость вакуума);  $\rho$  — плотность расплава;  $I$  — величина электрического тока.

По схеме (рис. 1) экспериментально исследовались электровихревые течения в расплаве Мп-Ni эвтектического состава при давлении  $P = 4.0 - 5.0$  ГПа и температурах от 1300 до 1800°C ( $\pm 50^\circ\text{C}$ ) в камере высотой  $h = 10^{-2}$  м и с радиусом  $r \approx 10^{-2}$  м (после сжатия). Кинематическая вязкость расплава  $\nu \approx 1.8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, величина тока в различных опытах составляла  $I = 1 - 2$  кА (дополнительное количество электрического тока, для обеспечения нагрева, пропускалось через изолированный нагреватель, не указанный на рис. 1). Определяемое по соотношению (3) значение скорости конвективного движения расплава всегда составляло

$v^* \geq 10^{-1}$  м/с, что обеспечивало значения чисел Рейнольдса, существенно большие, чем критическое ( $Re = 1500$ ).

После закалки расплавленных образцов (при скорости охлаждения приблизительно 1000 град/с) на их сколах отчетливо проявлялась "замороженная" диссипативная структура в виде сплошного множества сферолитов размером от  $10^{-4}$  м (при минимальном токе) до  $5 \cdot 10^{-6}$  м (при максимальном электрическом токе через расплав). В отдельных образцах, вследствие как бы "расплавания" вихрей из-за более медленного охлаждения, просматривались контуры бенаровских шестигранников, тоже разных размеров. То есть в отличие от опытов Бенара соотношение (1) не выполнялось: размер ячеек зависел, вообще говоря, от температуры, ее градиента, силы тока и скорости конвекции атомных ионов. Характер образующейся диссипативной структуры представлен на рис. 2.

Проведенные качественные испытания полученных образцов показали улучшение их физико-химических свойств после переплава с электровихревой обработкой. В частности, на несколько единиц (по шкале Роквелла) увеличилась микротвердость, в 1.5–2 раза прочность на излом и сжатие. Изменились и другие механические параметры. Их описание, а также результаты металлографических и структурных исследований полученных необычных композитов будут даны в последующем, более детальном сообщении.

### Список литературы

- [1] *Бояревич В.В. и др. Электровихревые течения.* Рига, 1985. 316 с.
- [2] *Сварка с электромагнитным перемешиванием / Под ред. В.П. Черныша.* Киев, 1983. 128 с.
- [3] *Гельфгат Ю.М. и др. Жидкий металл под действием электромагнитных сил.* Рига, 1976. 248 с.
- [4] *Никитин А.В., Гельфгат Ю.М., Минеев Л.И. II Всесоюзная конференция "Моделирование роста кристаллов". Ч. II.* Рига, 1987. С. 343–346.
- [5] *Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах.* М., 1979. 280 с.
- [6] *Поздняков В.А., Глезер А.М. // Письма в ЖТФ.* 1995. Т. 21. В. 1. С. 31–36.
- [7] *Херл Д.Т. Процессы роста и выращивания монокристаллов.* М., 1963. С. 303–312.
- [8] *Астабов А.М. Диссипативные структуры в кристаллогенезисе.* Сыктывкар, 1982. 26 с.
- [9] *Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления.* Л., 1967. 388 с.

Ивановский государственный  
университет

Поступило в Редакцию  
19 марта 1996 г.