

05;07

## **Образование слоистых периодических структур компонентов при интенсивном лазерном воздействии на гетерогенные материалы**

© В.С. Голубев, Ф.Х. Мирзоев

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура  
E-mail: mirzo@laser.nictl.msk.su

Поступило в Редакцию 4 июня 2001 г.

Представлена гидродинамическая модель периодического расслоения гетерогенных конденсированных систем из несмешиваемых компонентов при воздействии мощных лазерных пучков в режиме каналированного проникновения. Модель учитывает движение частиц несмешивающихся компонентов в вихревых течениях расплава под влиянием центробежных сил. Найдены условия возникновения периодического концентрационного расслоения и их пространственный масштаб.

При воздействии мощного лазерного излучения на гетерогенные материалы (в частности, на композиты) при определенных условиях происходит расслоение компонентов еще в жидкой фазе, фиксирующееся в виде периодических концентрационных структур при кристаллизации после прекращения действия облучения [1]. Являясь своеобразным дефектом, расслоение оказывает значительное влияние на различные физические и механические свойства обрабатываемого гетерогенного материала.

В течение периода застывания расплава, образованного в материале в результате глубокого проникновения в его объем мощного лазерного пучка, образующего неподвижный парогазовый канал (ПГК) (например, при точечной лазерной сварке), в объеме расплава существуют интенсивные вихревые течения в виде затопленных струй. Скорости движения жидкости в них могут достигать значений  $(0.5-10) \cdot 10^2$  cm/s [2-5].

Причины возникновения течений расплава могут состоять в следующем:

1) капиллярный коллапс [4] стенок ПГК, приводящий к "гофрированию", сопровождающемуся периодической структурой поля нестационарных течений в объеме расплава; характерное время процесса  $\sim 10^{-4} - 10^{-3}$  s. Пространственный масштаб нестационарностей типа "капиллярный коллапс" составляет величину порядка радиуса ПГК, т. е.  $r_0 \sim (2 \div 3) \cdot 10^{-2}$  см.

2) капиллярно-испарительная и термокапиллярная неустойчивости стенок ПГК [4,6,7], приводящие, в частности, к винтообразной форме поверхности канала. Взаимодействие аксиального потока пара, выходящего из канала, с такой поверхностью расплава может вызвать трехмерное течение в объеме расплава, содержащее азимутальную компоненту скорости [8].

В случае присутствия нерастворимой примеси в виде микрочастиц (или микрокапель) с размерами  $\sim 10^{-3} \div 10^{-2}$  см в затвердевающем расплаве, образовавшемся вокруг "неподвижного" ПГК, могут зафиксироваться периодические слои примесей. Это должно произойти в результате центробежного "убегания" тяжелой примеси на периферии вихрей расплава или "стягивания" легкой примеси к центрам вихрей.

Цель настоящей работы состоит в изучении механизма жидкофазного периодического расслоения гетерогенных материалов на основе несмешиваемых компонентов при глубоком проникновении в них мощных лазерных пучков и в определении условий возникновения периодических структур и их пространственного масштаба.

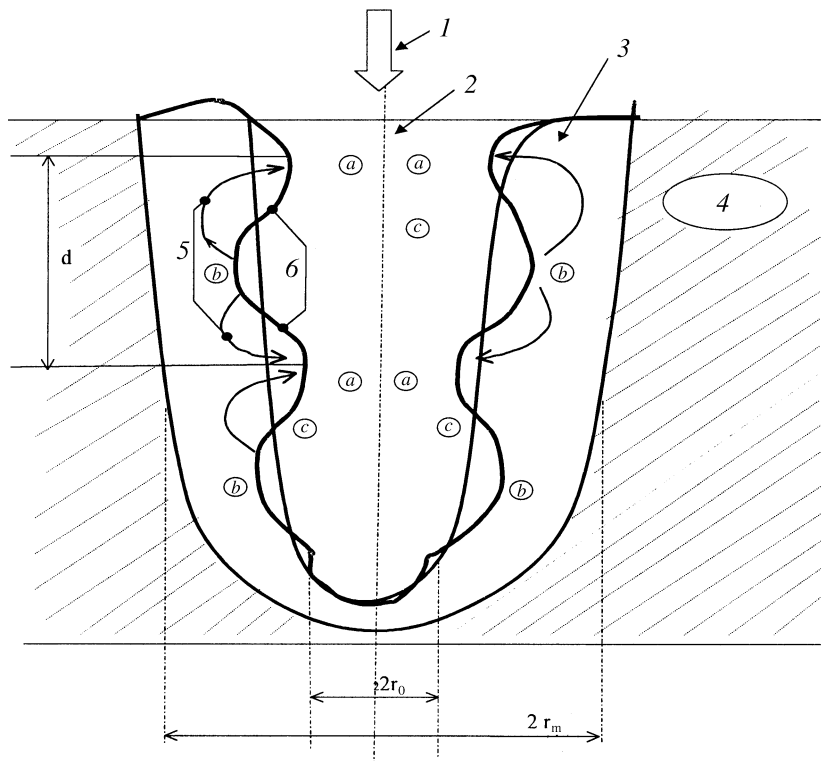
Пусть в среде, облучаемой мощным лазерным пучком, есть несмешивающиеся компоненты  $A$  и  $B$ , представляющие собой матрицу ( $A$  — основная, например, более легкая компонента) и микрочастицы компоненты  $B$  (например, более тяжелой). Эти микрочастицы могут иметь вид микрокапель, образовавшихся в результате кластеризации в расплаве и последующего диффузионного слияния кластеров, так что размеры микрочастиц могут находиться в диапазоне  $10^{-4} - 10^{-2}$  см [[1]. Например, это могут быть микрочастицы Pb в матрице Fe [1]. Микрочастицы могут также представлять твердые крупинки таких же размеров, если материал, из которых они состоят, более тугоплавок, чем материал матрицы (например, W в Fe). Если в расплаве, содержащем микрочастицы нерастворимой примеси, возникают вихревые движения, то микро-

частицы будут увлекаться (ускоряться) сначала вдоль линий тока силой скоростного напора течения основной компоненты ( $A$ ), одновременно отбрасываясь на периферию вихрей центральной силой. За достаточно короткие времена  $t \approx \tau_s = r_p^2 \rho_p / 9\nu \rho_L$  ( $\rho_L, \rho_p$  — плотности жидкости  $A$  и вещества  $B$  микрочастицы соответственно;  $r_p$  — размер микрочастицы;  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости  $A$ ) должно установиться стационарное радиальное (от центра вращения вихря) движение микрочастиц относительно матрицы  $A$ . Скорость этого движения определяется балансом центробежной силы и силы вязкого гидродинамического торможения:  $v_p^{(cm)} \approx (\rho_p - \rho_L) r_p^2 v_m^2 / 9\rho_L \nu r_w$ , где  $v_m$  — азимутальная скорость вихревого движения основной жидкости  $A$ ,  $r_w$  — характерный размер вихря;  $v_p$  — радиальная составляющая скорости движения микрочастицы. Максимальный размер частиц будет определяться соотношением динамического давления движущейся относительно капли жидкости матрицы  $A$  и лапласова давления, определяемого силой поверхностного натяжения капли примеси, находящейся в матрице. Так как мы полагаем, что микрочастицы фракции  $B$  в процессе их движения относительно жидкости  $A$  не дробятся силой скоростного напора, равной  $\pi r_p^2 (\rho_L v_m^2 / 2)$ , то это означает, что размеры этих частиц соответствуют числам Вебера  $We = \rho_L v_m^2 r_p / \sigma < We_{cr} \cong 10$  [9], где  $\sigma$  — поверхностное натяжение микрочастицы. Отсюда следует, что размеры  $r_p$  микрочастиц не могут превышать значений  $r_p = r_{p(cr)} \cong \sigma We_{cr} / \rho_L v_m^2 \cong 2 \cdot 10^{-1}$  см ( $\sigma \cong 4 \cdot 10^2$  дин/см (Pb),  $\rho_L = 8$  г/см<sup>3</sup> (Fe),  $\rho_p = 11$  г/см<sup>3</sup> (Pb),  $\nu = 3 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с,  $v_m = 50$  см/с).

В зонах соприкосновения соседних вихрей будет происходить относительное увеличение концентрации микрочастиц, что приведет после затвердевания расплава к образованию слоев, обогащенных примесью  $B$ .

Если микрочастицы примеси  $B$  легче, чем материал матрицы  $A$  (т.е. если  $\rho_p < \rho_L$ ), то в поле центробежной силы эти микрочастицы "всплывут" к центру вихря, в отличие от более тяжелых ( $\rho_p > \rho_L$ ) частиц, которые "утонут" к периферии вихря.

Вихревые движения расплава характерны для процесса капиллярного гофрового коллапса канала (см. рисунок). Длина волны  $\Lambda$  гофры при таком коллапсе  $\Lambda = 2\pi/k_m$ ,  $k_m \cong (r_0\sqrt{3})^{-1}$  ( $k_m$  — максимальное волновое число возмущений). Время  $\tau_c$  развития коллапса, т.е. время, за которое амплитуда гофры нарастает до значения  $\sim r_0$ , составляет  $\tau_c \cong (r_0\sqrt{3})^{3/2} (\rho_L/\sigma_L)^{1/2}$  [4] ( $\sigma_L$  — поверхностное натяжение основной



Схематическое изображение парогазового канала: 1 — лазерный пучок; 2 — парогазовый канал; 3 — расплав; 4 — твердая фаза; 5 — течения расплава; 6 — гофры.

компоненты расплава). Скорость течения расплава к вершинам гофр в процессе коллапса (это течение носит вихревой характер, как это видно из рисунка), равна

$$v_m \cong r_0 / \tau_c \approx 0.5 \left( \frac{\sigma_L}{\rho_L r_0} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

При  $\sigma_L = 1.6 \cdot 10^3 \text{ din/cm}$ ,  $r_0 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$  значение  $v_m$  составляет  $\sim 50 \text{ cm/s}$ .

Время затвердевания  $\tau_f$  расплава составляет

$$\tau_f \cong \left( \frac{\bar{T} - T_m}{T_m} \right) \frac{r_m^2}{\chi}, \quad (2)$$

где  $\bar{T}$  — средняя температура расплава перед началом охлаждения (в момент выключения лазерного пучка);  $r_m$  — средний радиус зоны расплава. Согласно [10],  $r_m \cong r_0(h/r_0)^{1-T_m/T_B}$ , где  $T_B, T_m$  — соответственно температура кипения и плавления основного материала расплава,  $h$  — глубина парогазовой каверны. В случае Fe ( $T_m \cong 1.8 \cdot 10^3$  К;  $T_B \cong 3 \cdot 10^3$  К) и при  $h \cong 0.5$  см значение  $r_m$  составляет  $r_m \cong 4r_0 \cong 0.8 \cdot 10^{-1}$  см.

Радиальная зависимость температуры расплава имеет вид

$$T(r) = T_B \frac{\ln(h/r)}{\ln(h/r_0)}. \quad (3)$$

Усредняя по цилиндрическому слою, для начальной температуры расплава имеем:

$$\bar{T} \cong T_B \left[ 1 - \frac{\ln(r_m/r_0) - 1/2}{\ln(h/r_0)} \right] \cong 0.7T_B. \quad (4)$$

Таким образом, время затвердевания расплава равно

$$\tau_f \cong \frac{8}{3} \cdot \frac{r_0^2}{\chi}. \quad (5)$$

Условие образования слоистых периодических структур затвердевшей нерастворимой примеси можно представить в виде

$$\nu_p \tau_f \geq r \cong r_0, \quad (6)$$

где  $r$  — радиус вихревого течения расплава в процессе капиллярного гофрового коллапса. Используя (1) и (5), из (6) имеем:

$$(\rho_p/\rho_L - 1)(\sigma/\rho_L r_0)(r_0^2/\nu\chi) \geq 14.$$

При значениях параметров  $\chi = 10^{-1}$  см<sup>2</sup>/с,  $\nu \cong 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с отсюда находим, что размеры частиц должны превышать значение  $r_\rho = 7 \cdot 10^{-4}$  см.

Следовательно, при застывании "неподвижного" цилиндрического слоя расплава с коллапсирующим гофрирующимся ПГК следует ожидать

образования периодически расположенных вдоль ПГК слоев нерастворимой примеси в виде поперечных направлению оси ПГК искривленных "дисков". Если примесь тяжелая, то эти слои должны быть "привязаны" к "пучностям", т.е. впадинам гофр (зоны  $a$  и  $b$ , см. рисунок); если примесь легкая — то слои должны быть "привязаны" к "узлам" гофр (зоны  $c$ ). Пространственный масштаб возникающих таким образом периодических концентрационных структур:  $d = \Lambda$ .

Таким образом, рассмотрена качественная модель образования слоистых структур компонентов в застывающем расплаве после воздействия на гетерогенную систему лазерного пучка, вызывающего глубокое проплавление. Модель объясняет образование слоев центробежным "разбеганием" либо "стягиванием" микрочастиц размером  $\sim 10^{-4} - 10^{-3}$  см примеси (либо более тяжелой, либо более легкой по отношению к основному материалу). Этот центробежный эффект должен проявляться в вихревых течениях расплава со скоростями  $\sim (0.5 - 1) \cdot 10^2$  см/с, генерируемых гидродинамическими неустойчивостями определенной природы. В случае неподвижного цилиндрически-симметричного слоя расплава, окружающего ПГК, вихревые течения возникают вследствие гофрового капиллярного коллапса ПГК. После выключения лазерного излучения и затвердевания расплава фиксируются периодические слои из нерастворимой примеси, имеющие вид искривленных "дисков", поперечных оси лазерного пучка. Пространственный масштаб возникающих слоистых структур составляет  $d = 2 \cdot 10^{-1}$  см, что примерно соответствует экспериментальным данным работ [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 00-02-17664).

## Список литературы

- [1] Шуганов И.Н. // Вестник МГТУ. 1998. № 3. С. 125–30; Proc. SPIE. 1999. V. 3688. P. 211–216.
- [2] Mastsunawa A., Seto N., Kim. J. et al. // Proc. SPIE. 2000. V. 3888. P. 34–39.
- [3] Golubev V.S. // Proc. SPIE. 2000. V. 3888. P. 244–255.
- [4] Голубев В.С. Анализ моделей динамики глубокого проплавления материалов лазерным излучением // Препринт ИПЛИТ РАН. № 83. 1999.
- [5] Caillibotte G., Kechemair D., Sabatier L. // Proc. SPIE. 1991. V. 1502. P. 50–57.
- [6] Мирзоев Ф.Х., Панченко В.С., Шелепин Л.А. // УФН. 1996. Т. 166. № 1. С. 3–33.

- [7] *Mirsoev F.Kh., Shelepin L.A.* // J. Laser Research. 1998. V. 19. N 6. P. 528–546.
- [8] *Каюков С.В., Гусев А.А., Зайчиков Е.Г.* и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 1997. № 7. С. 25.
- [9] *Волощук В.М., Седунов Ю.С.* Процессы коагуляции в дисперсных системах. М., 1975.
- [10] *Веденев А.А., Гладуш Г.Г.* Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 207 с.