

03;07

Центробежные эффекты расслоения при воздействии сканирующих лазерных пучков на гетерогенные системы из несмешивающихся компонентов

© В.С. Голубев, Ф.Х. Мирзоев

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

Поступило в Редакцию 4 мая 2001 г.

Предложена гидродинамическая модель расслоения гетерогенных систем из несмешиваемых компонентов при воздействии на них сканирующих лазерных пучков в режиме каналированного проникновения. Модель учитывает движение частиц несмешивающихся компонентов в вихревых течениях расплава под действием центробежных сил. Получены оценки характерного времени развития процесса и размеров сепарируемых микрочастиц, а также аналитические условия возникновения концентрационного расслоения.

Известно [1], что при воздействии мощного лазерного излучения на гетерогенные материалы (в частности, на композиты) при определенных условиях происходит расслоение компонентов еще в жидкой фазе, которое фиксируется при кристаллизации после прекращения действия облучения. 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 каналированного проникновения в его объем мощного лазерного пучка, образующего парогазовый канал (ПГК) (например, при лазерной сварке), в объеме расплава существуют интенсивные течения в виде затопленных вихревых струй. Скорости движения жидкости в них могут составлять $10^2 - 10^3$ cm/s [2–5].

Причины возникновения течений в расплаве могут заключаться в следующем: а) термокапиллярном увлечении поверхностного слоя жидкости [5–7] с последующим замыканием образовавшейся струи через объем жидкости, т.е. с формированием вихревого движения;

б) увеличении поверхностного слоя жидкости тангенциальным импульсом конденсирующего потока пара [5]; в) инъекции затопленной струи в ванну расплава со стороны слоя расплава, образующегося на фронтальной стенке ПГК, вдоль которой от входа в канал к его дну движется "ступенька" [2–5], генерируемая трехмерным тепловым полем во входной зоне фронтальной стенки [3,5]; г) инъекция в ванну расплава струи с фронтальной стенки ПГК, движимой импульсами всплесков давления пара [5], возникающих в ПГК вследствие срыва внутрь канала микрокапель с поверхности расплава [4,5].

Если образующийся при лазерном воздействии расплав многокомпонентен, то в застывшем ПГК могут возникать структуры, соответствующие таким вихрям в расплаве.

Цель настоящей работы состояла в изучении механизма жидкофазного расслоения гетерогенных материалов на основе несмешиваемых компонентов при воздействии на них сканирующих лазерных пучков и в разработке его качественной физической модели.

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 которого они состоят, более тугоплавок, чем материал матрицы (например, W в Fe). Если в расплаве, содержащем микрочастицы нерастворимой примеси, возникают вихревые движения, то микрочастицы 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 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. Максимальный размер частиц будет определяться соотношением динамического давления движущейся относительно капли жидкости ма-

трицы A и лапласова давления, определяемого силой поверхностного натяжения капли примеси, находящейся в матрице.

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

Получим оценки характерных времен и скоростей центробежной сепарации микрочастиц в зонах вихревого движения. Пусть v_m есть азимутальная скорость вихревого движения основной жидкости A , r_w — характерный размер вихря; v_φ , v_p — азимутальная и радиальная составляющие скорости движения микрочастицы, имеющей характерный размер r_p ; ρ_L , ρ_p — плотности жидкости A и вещества B микрочастицы соответственно; ν — кинематическая вязкость жидкости A . Движение одиночной микрочастицы в радиальном направлении описывается уравнением

$$\frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_p \frac{dv_p}{dt} = F_r + \frac{4}{3} \pi r_p^3 \frac{(\rho_p - \rho_L) v_\varphi^2}{r}. \quad (1)$$

Первое слагаемое в правой части (1) учитывает гидродинамическое сопротивление сферической частицы движению в радиальном направлении, второе — влияние центробежных сил.

Сила сопротивления частицы в расплаве имеет вид

$$F_r \cong \frac{1}{2} C_f^{(r)} \pi r_p^2 \rho_L |v_L - v_p| (v_L - v_p), \quad (2)$$

где $C_f^{(r)}$ — коэффициент сопротивления частицы; v_L — локальная радиальная скорость течения несущей фазы. Для числа Рейнгольда $Re_p = 2r_p |v_L - v_p| / \nu$ из интервала $1 < Re_p < 500$, $C_f^{(r)}$ описывается формулой [8]:

$$C_f^{(r)} = \frac{48}{Re_p} \left(1 - \frac{2.2}{\sqrt{Re_p}} \right) \approx 48 Re_p^{-1}. \quad (3)$$

Так как концентрация и размеры частиц достаточно малы, движение расплава за счет движения частиц не учитываем. Также не учитываем действие сил гравитации по сравнению с остальными силами.

С учетом (2) и (3) уравнение (1) представим в виде

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{(\rho_p - \rho_L) v_\varphi^2}{\rho_p r} + \frac{9 \rho_L \nu (v_L - v_p)}{\rho_p r_p^2}.$$

Далее будем рассматривать радиальное движение микрочастицы для времен $t \gg \tau_\varphi$ (τ_φ — характерное время для движения частиц в азимутальном направлении). Полагая в (4) $v_\varphi \cong v_m$, имеем

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{v_p}{v_m} \right) = -\frac{1}{\tau_s} \left(\frac{v_p - v_L}{v_m} \right) + \frac{1}{\tau_m}, \quad (5)$$

где $\tau_s = r_p^2 \rho_p / 9\nu \rho_L$ — характерное время вязкой релаксации частиц; $\tau_m^{-1} = (\rho_p - \rho_L) r_w / v_m \rho_p$.

Уравнение (5) при $v_L = \text{const}$ имеет решение

$$\frac{v_p}{v_m} = \left(\frac{\tau_s}{\tau_m} + \frac{v_L}{v_m} \right) \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_s} \right) \right).$$

В установившемся режиме (при $t \gg \tau_s$) отсюда находим:

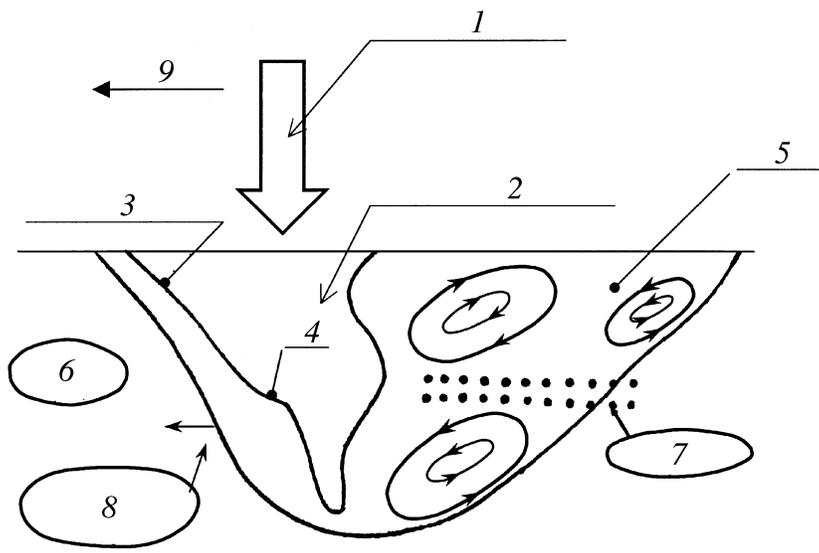
$$v_p^{(cm)} = v_m \frac{\tau_s}{\tau_m} + v_L \approx \frac{(\rho_p - \rho_L) r_p^2 v_m^2}{9\rho_L \nu r_w} + v_L.$$

Для значений параметров $\rho_L = 8 \text{ g/cm}^3$ (Fe), $\rho_p = 11 \text{ g/cm}^3$ (Pb), $r_p = 3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$, $\nu = 3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, $v_m = 10^2 \text{ cm/s}$ [3], $r_w = 10^{-1} \text{ cm}$, значения τ_s , τ_m , v_p таковы: $\tau_s \cong 2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$; $\tau_m \cong 10^{-3} \text{ s}$; $v_p^{(cm)} \cong 10 \text{ cm/s}$.

Пусть h — высота ванны расплава. Тогда характерный радиус вихрей составляет $r_w \approx h/4$. Длина ванны расплава при достаточно больших скоростях сканирования превышает ее высоту, и характерная геометрия поля скоростей расплава при этом соответствует двум вихрям, причем в срединной части зоны расплава направления скоростей в вихрях совпадают (см. рисунок). Если в расплаве содержатся нерастворимые и более тяжелые, чем материал, матрицы расплава, микрочастицы размером $r_p \approx 10^{-3} \div 10^{-2} \text{ cm}$, то их центробежная скорость, согласно (6), должна составлять (при $h \sim 0.5 \text{ cm}$): $v_p \cong (1 - 10^2) \text{ cm/s}$.

Если за время затвердевания r_f расплава более тяжелые микрочастицы успевают сдвинуться к срединной зоне ванны (т.е. на периферию вихря) на характерное расстояние порядка $h/4$, то в этой зоне образуется затвердевший слой примеси материала микрочастиц. Более легкие микрочастицы в случае двух вихрей на высоте ванны соберутся на расстоянии $h/4$ от верха и от низа ванны расплава (вдоль траектории движения центров вихрей). Условие образования такого рода слоев можно записать в виде

$$v_p \cdot \tau_f > \frac{h}{4}. \quad (4)$$



Схематическая геометрия парогазового канала и ванны расплава в случае сканирующих лазерных пучков: 1 — лазерный пучок; 2 — парогазовый канал; 3 — фронтальный слой расплава; 4 — ступенька; 5 — расплав; 6 — твердая фаза; 7 — слой частиц; 8 — направленное движение фронта; 9 — направление сканирования.

Время затвердевания расплава составляет по порядку величины: $\tau_f \cong 2r_0^2/\chi$, где r_0 — радиус ПГК, χ — температуропроводность расплава.

Тогда условие (7) принимает вид $(\rho_p/\rho_L - 1)(r_p r_0 v_m/h)^2 \times (\chi\nu)^{-1} \geq 0.3$. Для типичного случая $v_m \cong 10^2$ см/с [3]; $r_0 \cong 2 \times 10^{-2}$ см; $\nu \cong 3 \cdot 10^{-3}$ см²/с; $\chi \cong 10^{-1}$ см²/с; $h \cong 0.5$ см отсюда следует характерный размер микрочастиц r_p , которые могут участвовать в образовании слоев: $r_p \geq 6 \cdot 10^{-3}$ см. Таким образом, микрочастицы с размерами в диапазоне $\sim 10^{-3} \div 10^{-2}$ см могут сформировать слои соответствующей нерастворимой примеси в затвердевшем расплаве после сканирования мощного лазерного пучка, вызывающего глубокое проплавление гетерогенного материала.

Рассмотрим теперь роль неучтенных факторов. В приводимых оценках мы пренебрегли изменением радиальной координаты (r) микрочастицы за время ее движения, что применимо для времен $t \ll r/v_p \cong \cong 10^{-2} \div 10^{-1}$ s. Поскольку 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 $We = \rho_L v_m^2 r_p / \sigma < We_{cr} \cong 12$, где σ — поверхностное натяжение микрочастицы ($\sigma \cong 4 \cdot 10^2$ dyn/cm для Pb). Отсюда следует, что размеры r_p микрочастиц не могут превышать значений $r_p = r_{p(cr)} \cong \sigma We_{cr} / \rho_L v_m^2 \cong 5 \cdot 10^{-2}$ cm.

В уравнении (1) мы пренебрегли гравитационной силой Δmg ($\Delta m = m(\rho_p - \rho_L) / \rho_L$, $m = 4\pi r_p^3 \rho_p / 3$ — масса частицы) по сравнению с центробежной силой: $\Delta m v_\varphi^2 r^{-1}$. Действительно, отношение гравитационной силы к центробежной составляет величину $gr/v_\varphi^2 \cong 10^{-4} \ll 1$. Для движений по азимутальному направлению вихря, в случае если направление его вектора скорости совпадает с направлением вектора силы тяжести, отношение гравитационной силы и силы скоростного напора потока составляет величину $\sim (\rho_p - \rho_L) g \tau_\varphi / \rho_p v_m \cong 3 \cdot 10^{-4} \ll 1$.

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.

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 $\sim 10^{-4} - 10^{-3}$ cm примеси (либо более тяжелой, либо более легкой по отношению к основному материалу). Этот центробежный эффект должен проявляться в вихревых течениях расплава, со скоростями $\sim 10^2$ cm/s, генерируемых гидродинамическими неустойчивостями определенной природы. В случае непрерывного режима лазерного излучения при непрерывном сканировании пучка вдоль поверхности материала, в расплаве могут существовать нестационарные периодически повторяющиеся трехмерные вихревые течения, объясняемые инжекцией затопленных струй расплава с передней стенки ПГК, связанной с режимом движущейся вдоль этой стенки уступа из материала расплава.

После затвердевания гетерогенного расплава, позади движущейся ПГК, фиксируются слои нерастворимой примеси, имеющие вид полос, поперечных оси лазерного пучка. Такие структуры экспериментально наблюдались в ряде гетерогенных систем, в частности, в Fe-(Cu-Pb), при их облучении мощными сканирующими лазерными пучками. При этом верхние и нижние слои представляли собой практически чистое железо (фаза А), а в середине наблюдалось образование медно-свинцовой фазы (фаза В).

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

Список литературы

- [1] *Шиганов И.Н.* // Вестник МГТУ. 1998. № 3. С. 25–30; Proc. SPIE. 1999. V. 3688. P. 211–216.
- [2] *Matsunawa A., Seto N., Mizutani M., Katayama S.* // Proc. ICALEO. 1998. Ed. LIA. 1998. V. 85. P. 151–157.
- [3] *Matsunawa A., Seto N., Kim J. et al.* // Proc. SPIE. 2000 V. 3888. P. 34–39.
- [4] *Golubev V.S.* // Proc. SPIE. 2000. V. 3888. P. 244–255.
- [5] *Голубев В.С.* Анализ моделей динамики глубокого проплавления материалов лазерным излучением. Препринт ИПЛИТ РАН № 83, 1999.
- [6] *Gaillibotte G., Kechemair D., Sabatier L.* // Proc. SPIE. 1991. V. 1502. P. 50–57.
- [7] *Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А.* // УФН. 1996. Т. 166. № 3. С. 3–33.
- [8] *Лиханский В.В., Лобойко А.И.* // Квант. электрон., 2000. Т. 30. № 9. С. 827–832.