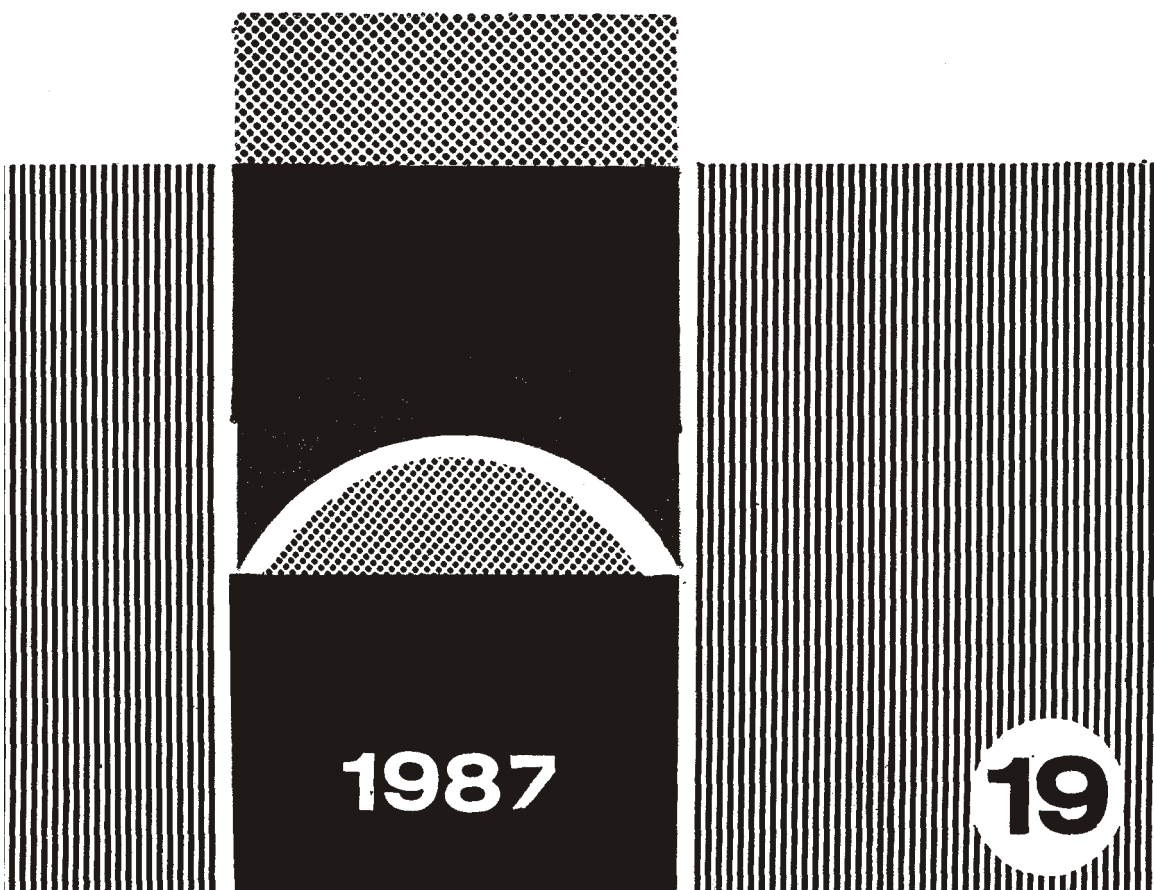


АДГЕЗИЯ РАСПЛАВОВ И ПАЙКА МАТЕРИАЛОВ

ISSN 0136-1732



1987

19

- кинетику растекания // Адгезия расплавов.— Киев : Наук. думка, 1974.— С. 11—15.
17. Быховский А. И. Растекание.— Киев : Наук. думка, 1983.— 190 с.
 18. Пинес Б. Д., Гребенник И. П., Зыман З. З. О соотношении между эффективным и истинным коэффициентами поверхностной диффузии // Физика металлов и металловедение.— 1969.— 27, № 2.— С. 307—314.
 19. Гребенник И. П., Лангхаммер И., Тонкопряд А. Г. Кинетика растекания жидкого галлия по поверхности пленок Ag с искусственно заданной шероховатостью // Адгезия расплавов и пайка материалов.— Киев : Наук. думка.— 1979.— Вып. 4.— С. 28—31.
 20. Должикова В. Д. Исследование кинетических закономерностей растекания ртути по поверхности твердых металлов : Автореф. дис. ... канд. хим. наук.— М., 1975.— 16 с.
 21. Исследование влияния процессов взаимодействия расплава с подложкой на кинетику растекания галлия по поверхности тонких пленок серебра / И. П. Гребенник, И. Лангхаммер, А. Г. Тонкопряд и др. // Физика и химия обраб. материалов.— 1978.— № 4.— С. 75—80.

Харьк. ун-т

Получено 26.04.85

УДК 532.64

Н. Т. Гладких, В. И. Ларин, С. В. Дукаров

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ СМАЧИВАНИИ ОСТРОВКОВЫМИ КОНДЕНСАТАМИ МЕТАЛЛОВ СВОБОДНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК

Исследования взаимодействия твердой и жидкой фаз представляют кроме чисто научного и практический интерес, так как явления, наблюдающиеся на границе контакта, оказываются определяющими во многих технологических процессах, например в металлургии, при соединении материалов, нанесении покрытий, пропитке и др. Для массивных объектов в этом направлении ведутся интенсивные исследования и на основании накопленного фактического материала делаются обобщения, позволяющие в ряде случаев предсказать степень смачивания для конкретных систем [1, 2]. В случае когда одна из фаз является высокодисперсной, характер контактного взаимодействия существенно усложняется вследствие появления размерных эффектов. Так, например, в работах [3, 4] установлено, что при смачивании аморфных подложек микрокаплями металла размером $R \leq 20$ нм имеет место размерный эффект, проявляющийся в уменьшении краевого угла. Размерные эффекты наблюдаются также в системах с высокодисперсной твердой фазой, например при смачивании ультратонких пленок, нанесенных на массивное основание [5, 6]. Учитывая практическую важность знания капиллярных свойств микрообъектов для управления такими процессами, как пропитка пористых сред, пайка и сварка через дисперсные среды, спекание порошков и т. д., представляется необходимым дальнейшее исследование смачивания в высокодисперсных системах.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального изучения смачивания островковыми вакуумными конденсатами средней дисперсности свободных аморфных углеродных пленок различной толщины, выполненные с целью получения сведений о поверхностной энергии пленок. Выбор объекта обусловлен тем, что пленки углерода широко используются в тонкопленочной технологии, а углеродные волокна, пропитанные различными металлами и сплавами, являются основой многих композиционных материалов. Для исследований использовались металлы (In, Sn и Pb), химически инертные по отношению к углероду.

Образцы препарировались конденсацией металлов по механизму пар — жидкость на свободные углеродные пленки в вакууме 10^{-3} — 10^{-4} Па. Толщина пленок углерода (t) изменялась в пределах 4—30 нм, а размер жидких металлических частиц составлял 30—500 нм и ограничивался, с одной стороны, необходимостью исключить размерный эффект, связанный с дисперсностью жидкой фазы, а с другой — проч-

ностью углеродных пленок. Краевые углы смачивания и толщины пленок углерода определялись электронно-микроскопически по методу свертки [3, 4].

При электронно-микроскопических исследованиях профилей капель металла было обнаружено существенное различие в форме межфазной границы капля — пленка для микрочастиц, сконденсированных на сво-

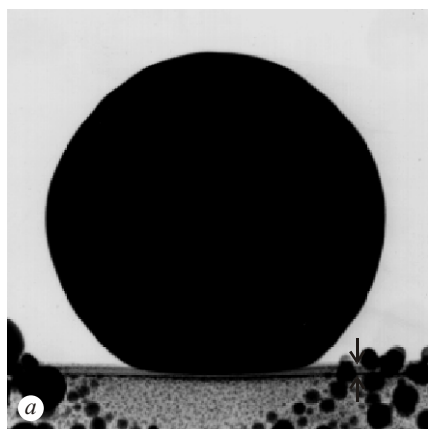
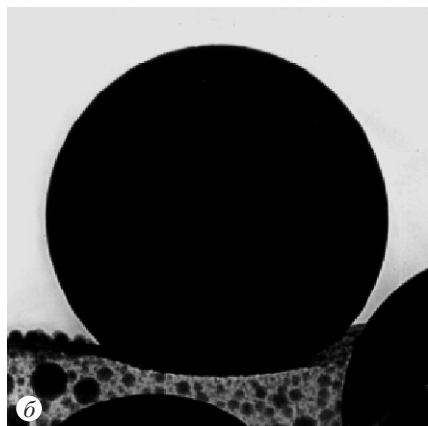
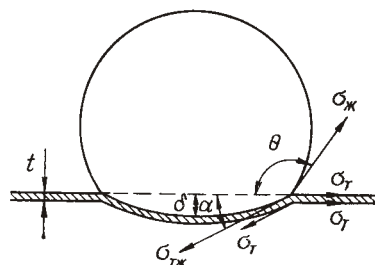


Рис. 1. Микроснимки капель олова, конденсированных на углеродные пленки толщиной 10 нм (а) и 20 нм (б) (толщина пленок указана стрелками), $\times 150\,000$.

Рис. 2. Схема жидкой капли на свободной тонкой пленке.



бодные пленки и на пленки, находящиеся на твердой поверхности. Это различие заключается в том, что в случае когда пленка достаточно тонка, она деформируется каплей (рис. 1), в то время как у частиц, конденсированных на твердую поверхность, граница раздела жидкость — подложка остается плоской. Угол смачивания (Θ) для капли на тонкой пленке определялся как угол между плоскостью пленки и касательной к жидкой поверхности в точке тройного контакта фаз. Схематическое изображение капли на деформированной пленке приведено на рис. 2.

Параметры, характеризующие форму частиц: радиус кривизны поверхности капли R , радиус основания r и ее высота H измерялись на

микроснимках свернувшихся участков пленки с закристаллизовавшимися частицами (рис. 1). Согласно выполненным исследованиям микрокапли имеют форму сферического сегмента, и поэтому для нахождения Θ можно воспользоваться одним из соотношений

$$\begin{aligned}\Theta_1 &= 2\arctg H/r, \\ \Theta_2 &= \arccos(1 - H/R), \\ \Theta_3 &= 180^\circ - \arcsin r/R, \text{ при } \Theta > 90^\circ.\end{aligned}\quad (1)$$

Для сферических частиц величины Θ_1 , Θ_2 и Θ_3 должны быть равны, однако так как при кристаллизации возможно некоторое искажение формы капель (вследствие появления огранки, а также изменения объема при затвердевании), эти величины несколько различны, и поэтому для повышения точности определения углов необходимо брать среднее значение $\bar{\Theta} = \frac{1}{3}(\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3)$. Погрешность определения краевого угла находилась из соотношения $\Delta\Theta = \Delta\Theta_u + \Delta\Theta_s$, где $\Delta\Theta_u = 1 \div 2^\circ$ — инстру-

ментальная ошибка, а $\Delta\Theta_c = [(\Theta_1 - \bar{\Theta})^2 + (\Theta_2 - \bar{\Theta})^2 + (\Theta_3 - \bar{\Theta})^2]^{1/2}$ — погрешность, обусловленная отклонением формы капли от сферической.

При фиксированной толщине углеродной пленки измерялись краевые углы для 20—30 частиц и среднее значение Θ для данного образца определялось с учетом погрешностей следующим образом:

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \frac{\Theta_i}{\Delta\Theta_i} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\Delta\Theta_i}, \quad (2)$$

где n — количество капель ($i=1, 2, \dots, n$).

В результате измерений краевого угла смачивания металлами свободных углеродных пленок получено, что при $t < 30$ нм угол уменьшается с толщиной пленки. При $t > 30$ нм краевой угол приближается к

постоянному значению Θ_∞ , равному углу смачивания металлом толстой углеродной пленки, находящейся на твердой поверхности. Величины Θ_∞ для свободных пленок согласуются с данными [3, 4], полученными для пленок толщиной 20—50 нм, нанесенных на монокристаллы KCl. Экспериментальные зависимости $\Theta(t)$ для систем In/C, Sn/C и Pb/C приведены на рис. 3. Уменьшение краевого угла смачивания при толщинах пленок $t \leq 5$ нм составляет $\approx 20^\circ$ и значительно превышает максимальную погрешность измерений. Выполненные исследования также показали, что угол Θ при любой толщине пленки в пределах погрешности измерений не зависит от размеров частиц в интервале $30 < R < 500$ нм.

При анализе микроснимков профилей капель, сконденсированных на пленках различной толщины, было установлено, что величина прогиба пленки возрастает с уменьшением ее толщины и становится существенной при $t < 10$ нм. Для толстых пленок ($t > 20$ нм) деформация оказывается незначительной.

Анализ зависимости $\Theta(t)$ с учетом деформации свободной пленки может быть проведен следующим образом. Часть свободной энергии системы, обусловленная взаимодействием капли с пленкой, определяется выражением

$$F = \sigma_{ж} S_{ж} + (\sigma_t + \sigma_{тж}) S_{тж} - 2\sigma_t S + f S_{тж}, \quad (3)$$

где σ_t и $\sigma_{ж}$ — поверхностные энергии пленки и капли соответственно; $\sigma_{тж}$ — межфазная энергия границы пленка — капля; $S_{ж}$ и $S_{тж}$ — площади ограничивающих каплю поверхностей; S — площадь сечения капли в плоскости пленки и $f(t, \alpha)$ — энергия деформации пленки, отнесенная к единице площади. В качестве независимых переменных, характеризующих форму жидкой частицы, удобно выбрать угол смачивания Θ и угол прогиба α (рис. 2). Равновесному состоянию системы пленка — капля будет соответствовать минимум свободной энергии системы, т. е. $\partial F / \partial \Theta = 0$ и $\partial F / \partial \alpha = 0$. Воспользовавшись (3) и предполагая, что капля ограничена сферическими поверхностями, можно получить уравнения,

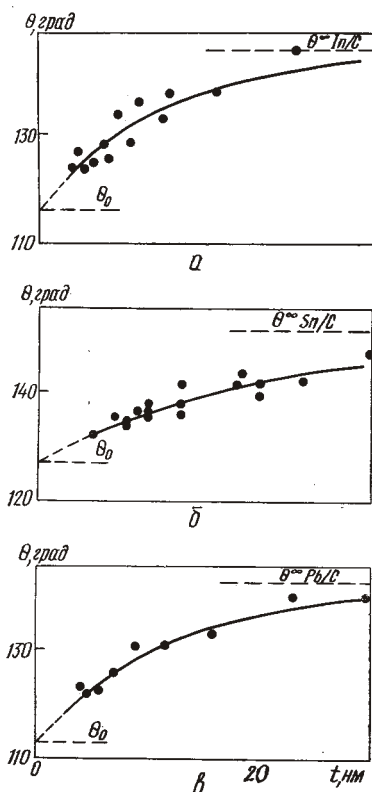


Рис. 3. Изменение краевого угла смачивания с толщиной свободных пленок углерода для In (а), Sn (б) и Pb (в).

описывающие равновесие капли на деформированной пленке:

$$\begin{cases} \sigma_{ж} \sin \Theta = (\sigma_{т} + \sigma_{тж}) \sin \alpha + \varphi(\alpha, t) \\ \sigma_{ж} \cos \Theta + (\sigma_{т} + \sigma_{тж}) \cos \alpha + \psi(\alpha, t) = 2\sigma_{т}, \end{cases} \quad (4a)$$

$$(4b)$$

где $\varphi(\alpha, t)$ и $\psi(\alpha, t)$ — слагаемые, учитывающие энергию деформации:

$$\varphi = f \sin \alpha + (1 + \cos \alpha) \frac{\partial f}{\partial \alpha}, \quad (5)$$

$$\psi = f \cos \alpha - \frac{(2 + \cos \alpha)(1 - \cos \alpha)}{\sin \alpha} \frac{\partial f}{\partial \alpha}.$$

Конкретный вид функции φ может быть получен в предположении упругой деформации пленки для предельных случаев, соответствующих деформации изгиба ($\delta \ll t$) и растяжения ($\delta \gg t$). Величина максимального прогиба в указанных предельных случаях, согласно [7, 8], определяется следующим образом:

$$\delta = \begin{cases} Apr^4/Et^3, & \text{при } \delta \ll t, \\ (Bpr^4/Et)^{1/3}, & \text{при } \delta \gg t, \end{cases} \quad (6)$$

где E — модуль Юнга материала пленки; A и B — постоянные, определяемые в первом приближении краевыми условиями, а p — давление, действующее на пленку и равное разности лапласовых давлений на поверхностях капли с различной кривизной, т. е.

$$p = \frac{2\sigma_{ж} \sin \Theta}{r} - \frac{2(\sigma_{т} + \sigma_{тж}) \sin \alpha}{r}. \quad (7)$$

С использованием соотношения (4a), (6) и (7) получим выражение для функции φ в виде

$$\varphi = \begin{cases} \frac{E}{2A} \frac{t^3 \delta}{r^3}, & \text{при } \delta \ll t, \\ \frac{E}{2B} \frac{t \delta^3}{r^3}, & \text{при } \delta \gg t. \end{cases} \quad (8a)$$

$$(8b)$$

Соотношения (8) качественно подтверждаются экспериментально. На рис. 4 приведены зависимости $\delta(r)$, которые получены для капель олова при фиксированной толщине свободной пленки углерода $t = 10$ нм. В соответствии с (8) зависимость $\delta(r)$ изменяет вид при переходе через точку $\delta = t$ и оказывается линейной при $\delta < t$ в координатах $\delta - r^3$, а при $\delta > t$ в координатах $\delta - r$. Сопоставление коэффициентов наклона зависимости $\delta(r)$ в различных координатах приводит к соотношению $(\delta/r)^3/(\delta/r^3) = (B/A)t^2$, из которого с использованием экспериментальных значений δ/r , δ/r^3 и t можно найти отношение B/A , оказавшееся равным $B/A = 1,8$. Если предположить, что граничные условия для пленки под каплей отвечают случаю пленки с закрепленными краями, то в соответствии с [7, 8] $A = 3/8$, $B = 3/4$, а $B/A = 2$, что хорошо согласуется со значением $B/A = 1,8$, вычисленным из экспериментальной зависимости $\delta(r)$. Таким образом, рассмотренная модель подтверждается экспериментальными данными.

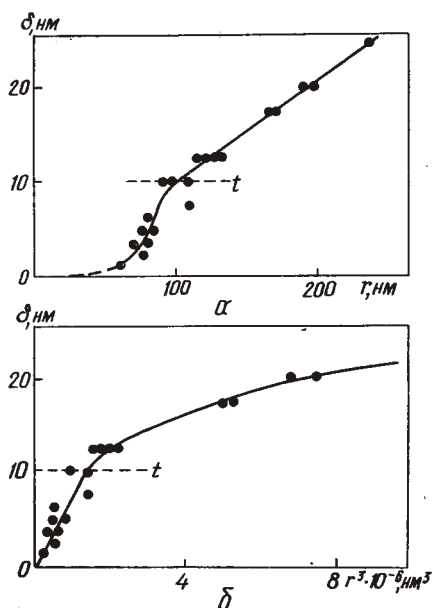


Рис. 4. Зависимость $\delta(r)$ в координатах $r - \delta$ (a) и $r^3 - \delta$ (б).

В рамках данного приближения по экспериментальной зависимости $\Theta(t)$ для различных металлов на одной и той же подложке можно определить величины σ_T для углеродных пленок. Для этого необходимо знать зависимость слагаемых φ и ψ от толщины пленки. Однако точное решение задачи о деформации тонкой пленки под жидкой каплей в общем случае затруднительно, поскольку согласно оценкам и экспериментальным данным при малых толщинах деформация пленок не является малой и, следовательно, нет оснований предполагать ее упругой. Следует учесть также, что упругие постоянные пленок существенно отличны от соответствующих характеристик массивных материалов, а зависимость деформации от напряжения в пленках оказывается нелинейной [7].

С другой стороны, задачу можно упростить, если принять во внимание следующее. Как видно из соотношения (8б), функция φ пропорциональна толщине пленки, а из (8б) и (5) следует, что и $\psi \sim t$ даже в случае только упругой деформации. Необходимо также учесть, что энергия деформации будет убывать с уменьшением толщины из-за понижения энергии связи атомов в пленке [9]. Следовательно, при уменьшении t слагаемые φ и ψ становятся малыми по сравнению с поверхностными энергиями контактирующих фаз. Физически это соответствует капле на жидкой пленке, когда образование прогиба происходит без затрат энергии. В этом предельном случае вместо (4) может быть записана система уравнений

$$\begin{cases} \sigma_{ж} \sin \Theta_0 = (\sigma_T + \sigma_{ТЖ}) \sin \alpha, \\ \sigma_{ж} \cos \Theta_0 + (\sigma_T + \sigma_{ТЖ}) \cos \alpha = 2\sigma_T, \\ \sigma_{ж} \cos \Theta_\infty = \sigma_T - \sigma_{ТЖ}. \end{cases} \quad (9)$$

Третье соотношение в (9) представляет уравнение Юнга для капли на плоской недеформированной поверхности, т. е. на достаточно толстой пленке ($\Theta_\infty = \Theta(t) |_{t \rightarrow \infty}$), а $\Theta_0 = \Theta(t) |_{t \rightarrow 0}$ соответствует смачиванию металлом жидкоподобной пленки. Система (9) может быть решена относительно σ_T :

$$\sigma_T = \frac{\sigma_{ж} \sin^2 \Theta_\infty}{4 (\cos \Theta_0 - \cos \Theta_\infty)}. \quad (10)$$

Таким образом, из (10) следует, что из экспериментальной зависимости краевого угла смачивания металлическими каплями тонкой свободной пленки от ее толщины можно определить величины Θ_0 и Θ_∞ и, воспользовавшись табличными данными по $\sigma_{ж}$, найти значение поверхностной энергии свободной пленки. Для определения Θ_0 использовалась интерполяционная формула, полученная с помощью численной обработки экспериментальных данных:

$$\Theta = \Theta_\infty - (\Theta_\infty - \Theta_0) \exp(-at). \quad (11)$$

На рис. 3 сплошными линиями нанесены зависимости $\Theta(t)$, полученные аппроксимацией с помощью соотношений (11) данных по смачиванию оловом, индием и свинцом свободных углеродных пленок. Видно, что экспериментальные точки удовлетворительно описываются интерполяционной формулой (11).

Результаты по смачиванию свободных углеродных пленок

Система	Θ_∞ , град	Θ_0 , град	$\sigma_{ж}$, мДж/м ²	σ_T , мДж/м ²
In/C	145	116	559	121±30
Sn/C	151	127	540	118±30
Pb/C	142	113	465	113±30

составляют $\sigma_T = 115 \pm 30$ мДж/м² при температуре 470—620 К.

В таблице приведены значения поверхностной энергии тонких углеродных пленок, определенные из (10) с помощью экспериментально найденных параметров Θ_0 и Θ_∞ . Величины σ_T , полученные для различных систем, хорошо согласуются между собой и

Сведения о поверхностной энергии аморфных углеродных пленок в литературе отсутствуют. Полученные в настоящей работе значения σ_t можно попытаться сравнить с имеющимися данными о поверхностной энергии различных модификаций углерода. Величины σ_t , найденные различными авторами, оказываются в весьма широком интервале 34,6—2580 мДж/м².

Ряд значений σ_t , рассчитанных ($\sigma_t \approx 170$ мДж/м² [10, 11]) или определенных экспериментально с помощью различных методов ($\sigma_t = 110,6$ мДж/м² [12] — смачивание; 110—120 мДж/м² [2] — смачивание, адсорбция, теплота растворения; 119 мДж/м² [13] — теплота смачивания; 130 мДж/м² [14] — уширение дислокационных рядов; 110—180 мДж/м² [15] — кинетика графитизации сплавов), неплохо согласуются с результатами настоящей работы. Величины $\sigma_t = 46$ мДж/м² [16] и $\sigma_t = 34,6$ мДж/м² [17], найденные из данных по смачиванию водой и органическими жидкостями различных типов графита и застеклованного углерода, вероятно, занижены вследствие адсорбции молекул жидкости на твердой поверхности [18].

Большие значения поверхностной энергии поликристаллического графита, измеренные в работах [19, 20] методом «нейтральной капли», можно объяснить следующим образом. Вследствие сильной анизотропии кристаллической решетки графита, значение σ_t для базисной (σ^b) и торцевой (σ^t) плоскостей существенно различны. Отношение σ^t/σ^b , найденное в работе [21] из теоремы Вульфа, оказывается весьма значительным и составляет $\sigma^t/\sigma^b \approx 13$. Следовательно, величины $\sigma_t = 2500$ мДж/м² [19] и $\sigma_t = 2580$ мДж/м² [20] обусловлены наличием на поверхности образца поликристаллического графита зерен с различной ориентацией. В связи с этим отметим также обнаруженное в работе [22] изменение поверхностной энергии пирографита от 2000 до 350 мДж/м² в зависимости от степени совершенства структуры образца и его предыстории (температуры и длительности отжига). Кроме того, величина $\sigma_t = 350$ мДж/м² [22] равно, как и расчетное значение $\sigma_t = 506$ мДж/м² [23], вероятно, не могут быть приняты в качестве характеристик аморфной углеродной пленки, так как вычисление Θ_0 из выражения (10) при $\sigma_t = 350$ мДж/м² приводит к величинам (≈ 130 , 140 и 135° соответственно для In, Sn и Pb), превышающим измеренные экспериментально.

Таким образом, в результате исследования смачивания жидкими металлическими частицами свободных тонких пленок обнаружено уменьшение краевого угла смачивания с уменьшением толщины пленок. Наблюдаемая зависимость $\Theta(t)$ обусловлена деформацией тонких свободных пленок жидкими каплями. На основании экспериментальных данных по зависимости $\Theta(t)$ и их анализа с учетом условий равновесия жидкой капли на тонкой деформированной пленке предложен метод определения поверхностной энергии тонкой пленки. Оценено значение поверхностной энергии аморфной углеродной пленки толщиной 5—20 нм.

В заключение отметим, что, как показывает количественный анализ, изменение Θ с толщиной свободной пленки вследствие теоретически предсказываемой зависимости поверхностной энергии пленки от ее толщины [24] примерно в 10 раз меньше, чем изменение краевого угла из-за деформации пленки. Следовательно, для обнаружения зависимости $\sigma(t)$ из данных по смачиванию свободных тонких пленок следует либо найти точное решение задачи о деформации пленки под жидкой каплей, либо использовать в качестве подложек пленки с высокими значениями поверхностной энергии, для которых, как видно из (10), изменение Θ вследствие деформации будет небольшим.

1. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах.— Киев : Наук. думка, 1972.— 196 с.
2. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание.— М. : Химия, 1974.— 400 с.
3. Гладких Н. Т., Ларин В. И., Усатенко О. В. Размерный эффект при смачивании // Физика и химия обраб. материалов.— 1979.— № 2.— С. 96—103.
4. Размерный эффект при смачивании островковыми пленками висмута и свинца углеродных подложек / С. П. Чижик, Н. Т. Гладких, Л. К. Григорьева и др. // Изв. АН СССР. Сер. Металлы.— 1981.— № 4.— С. 73—79.
5. Дукаров С. В., Степанова С. В. Смачивание островковыми конденсатами тонких пленок // Вестн. Харьк. ун-та.— 1984.— № 260.— С. 84—89.
6. Костюк Б. Д., Колесниченко А. Г., Шайкевич С. С. Смачивание расплавом олова пленок углерода и окиси алюминия, нанесенных на металлические поверхности // Адгезия расплавов и пайка материалов.— 1980.— Вып. 6.— С. 37—39.
7. Пинес Б. Д., Неуен Суан Тянь. Деформация и прочность тонких пленок // Физика металлов и металловедение.— 1965.— № 19.— С. 899—907.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости.— М. : Наука, 1965.— 204 с.
9. Замалин В. М., Норман Г. Э., Филиппов В. С. Метод Монте-Карло в статистической термодинамике.— М. : Наука, 1977.— 228 с.
10. Crowell A. D. Potential energy functions for graphite // J. Chem. Phys.— 1958.— 29, N 2.— P. 446—447.
11. Girifalco L. A., Lad R. A. Energy of cohesion, compressibility and the potential energy functions of the graphite system // Ibid.— 1956.— 25, N 4.— P. 693—697.
12. Morcos J. On contact angle and dispersion energy of the cleavage graphite/water system // J. Colloid and Interface Sci.— 1970.— 34, N 3.— P. 469—471.
13. Good R. J., Girifalco L. A., Kraus G. A. A theory for estimation of interfacial energies. 2. Application to surface thermodynamics of teflon and graphite // J. Phys. Chem.— 1958.— N 11.— P. 1418—1421.
14. Химические и физические свойства углерода / Под ред. Уокера.— М. : Мир, 1939.— 368 с.
15. Льяной В. Н. К определению поверхностной энергии графита // Изв. АН СССР. Сер. Металлы.— 1976.— № 5.— С. 59—63.
16. Огарев В. А. Смачиваемость поверхностей графита и застеклованного углерода // Коллоид. журн.— 1978.— 40, № 1.— С. 153—156.
17. Morcos J. Surface tension of stress-annealed pyrolytic graphite // J. Chem. Phys.— 1972.— 57, N 4.— P. 1801—1802.
18. Адамсон А. Физическая химия поверхностей.— М. : Мир, 1979.— 568 с.
19. Ниженко В. И., Флока Л. И. Поверхностные свойства железоуглеродистых расплавов на границах раздела расплав — пар и расплав — графит // Поверхностные явления в расплавах.— Киев : Наук. думка, 1968.— С. 130—139.
20. Ниженко В. И. Экспериментальная оценка свободной поверхностной энергии твердых тел // Там же.— С. 118—126.
21. Сидоренко Р. А. О поверхностной энергии кристаллов графита в чугунах // Там же.— С. 423—426.
22. Елютин В. П., Костилов В. И., Харитонов А. В. Влияние поверхностно-активных сред на поверхностную энергию пирографита // Физическая химия поверхностных явлений при высоких температурах.— Киев : Наук. думка, 1971.— С. 263—265.
23. Mezeu L. Z., Giber J. The surface free energies of solid chemical elements: Calculation from internal free enthalpies of atomization // Jap. J. Appl. Phys.— 1982.— 21, N 11.— P. 1569—1571.
24. Задумкин С. Н., Хоконов Х. Б. К теории поверхностной энергии работы выхода электрона из металла // Физика металлов и металловедение.— 1967.— 23.— С. 565—567.

Харьк. ун-т

Получено 09.08.85

УДК 548.52:546.26—162:669.14—154

В. С. Шумихин, А. К. Билецкий, А. М. Верховлюк

РОСТ КРИСТАЛЛОВ ГРАФИТА ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ

Форма графитовых включений в чугунах играет решающую роль при повышении его физико-механических свойств. В зависимости от условий получения и химсостава она меняется от пластинчатой к шаровидной. При этом существенное значение имеют наличие тех или иных легирующих и примесных элементов в жидком металле, модифицирование, скорость охлаждения и другие технологические параметры. Процесс получения отливок из высокопрочного чугуна тесно связан с шаровидной формой графита. Несмотря на большое народнохозяйствен-