

$\delta\omega(k)$ и ПМСВ будет обратной, так как $d\omega/dk \approx d(\delta\omega)/dk > 0$. Полевая зависимость величины K (определяющей „вихревой“ вклад в дисперсию ПМСВ), вычисленная на ЭВМ, приведена на рис. 1. Вид дисперсионной кривой ПМСВ представлен на рис. 2, качественно он согласуется с [7], где использовалась керамика высокотемпературного СП.

Авторы благодарны А.В. Вашковскому за интерес к работе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] П о п к о в А.Ф. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 5. С. 9-14.
- [2] Ш м и д т В.В. Введение в физику сверхпроводников. М.: Наука, 1982. 240 с.
- [3] П о п к о в А.Ф. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 9. С. 112-117.
- [4] Г о р ь к о в Л.П., Э л и а ш б е р г Г.М. // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. В. 2. С. 612-626.
- [5] Ц а р е в с к и й С.А. // ЖЭТФ. 1987. Т. 92. В. 5. С. 1903-1910.
- [6] S u h l Н. // Phys. Rev. Letts. 1965. V. 14. N 7. P. 226-229.
- [7] Л е б е д ь Б.М., Я к о в л е в С.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 19. С. 27-29.

Институт радиотехники и
электроники АН СССР,
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию
26 июля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 23

12 декабря 1990 г.

07; 11

© 1990

ДЕФОРМАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ САМООРГАНИЗАЦИИ КРУПНОМАСШТАБНОГО РЕЛЬЕФА ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.В. Б а ж е н о в, М.Н. Л и б е н с о н,
В.С. М а к и н, В.В. Т р у б а е в

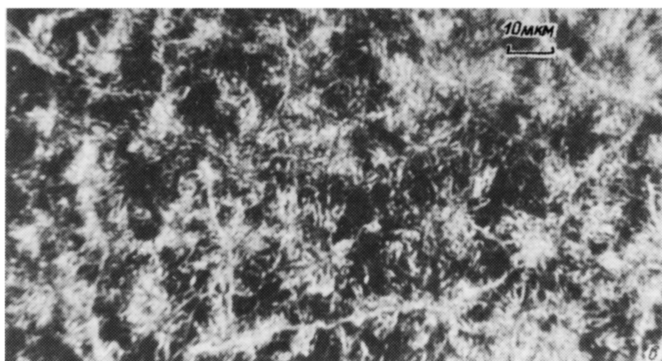
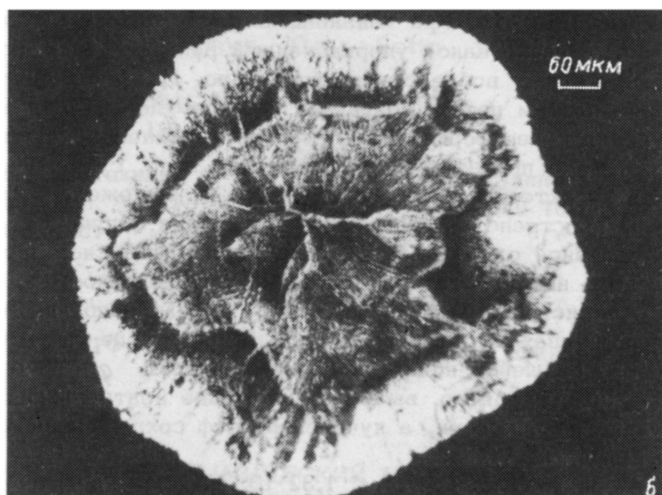
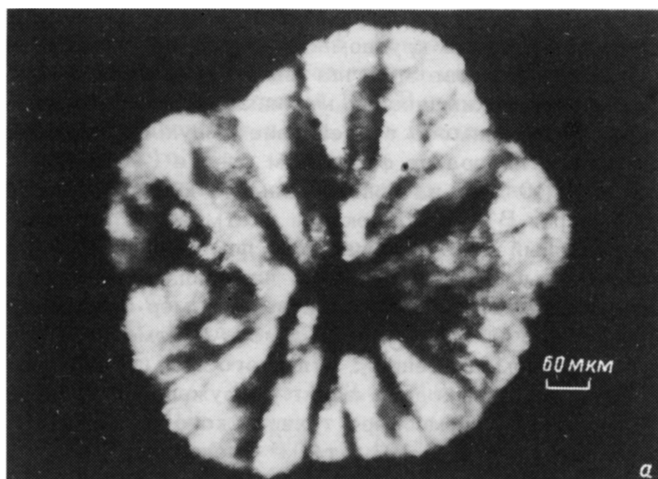
В последнее время повышенный интерес проявляется к лазерно-индуцированным процессам самоорганизации в различных системах. К таким процессам относится и формирование поверхностных периодических структур, связанное с резонансным возбуждением поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) и волноводных мод на границах раздела сред и их интерференцией с падающим излучением [1, 2]. Известны также явления спонтанного образования „нерезонансных“ поверхностных структур под воздействием силового лазерного излучения [3, 4].

Ниже приведены экспериментальные данные о ранее не наблюдавшейся самоорганизации крупномасштабного поверхностного рельефа при лазерном нагреве металла ниже точки плавления и обсуждается деформационно-химический механизм этого явления.

В опытах осуществлялось воздействие импульса свободной генерации неодимового лазера на фосфатном стекле ($\lambda = 1,054$ мкм, $\tau = 1$ мс, $E < 10$ Дж) на полированные и неполированные поверхности титана марки ВТ1-0 и циркония в атмосфере различных газов. Сформированный рельеф изучался с помощью оптического микроскопа МБИ-6. Высота микрорельефа измерялась на интерференционном микроскопе МИИ-4. Характерный размер зоны облучения составлял 1-2,5 мм. Облучение проводилось в атмосфере различных газов при нормальном давлении: для этого газ продувался через кювету с образцом, а выходной шланг погружался в глицерин.

Облучение титана в атмосфере технического азота при плотности светового потока $q \lesssim 9 \cdot 10^4$ Вт/см² приводило к образованию оксинитридной пленки. При $q \lesssim 1 \cdot 10^5$ Вт/см² возникал неупорядоченный рельеф поверхности. При дальнейшем росте потока ($q > 1,1 \times 10^5$ Вт/см²) формировался упорядоченный рельеф в виде исходящих из центра зоны воздействия пучей (рис. 1, а). Их число увеличивалось с ростом потока, а также по мере удаления от центра зоны облучения к периферии пятна (за счет ветвления). Амплитуда рельефа достигала при этом ~ 1 мкм. Для него, судя по морфологии, была характерна квазипериодичность и „наложение” структур с различным пространственным масштабом. Зона облучения, обладавшая повышенной отражательной способностью за счет растущего металлического нитрида титана, имела и микронеровности с характерным пространственным масштабом $\lesssim 1$ мкм, наиболее выраженные на выступах крупномасштабного рельефа, где была выше толщина образовавшейся пленки. Дальнейший рост q до значений $1,38 \cdot 10^5$ Вт/см², вероятно, вызывал плавление центральной зоны и сглаживание поверхности, а лучевой рельеф сохранялся лишь на периферии зоны.

В атмосфере воздуха при $q \lesssim 1,32 \cdot 10^5$ Вт/см² картина возникающего рельефа была аналогична формирующемуся в атмосфере азота, но образовывалась преимущественно пленка оксидов титана. Типичное расстояние между пучами на периферии зоны было не менее 4-5 мкм. При $q \gtrsim 1,32 \cdot 10^5$ Вт/см² наблюдалось резкое уменьшение масштаба лучевого рельефа - до величины 1-1,5 мкм; при этом он часто группировался в однонаправленный рельеф по блокам, несколько разориентированным друг относительно друга (рис. 1, б). Одновременно со скачкообразным изменением масштаба рельефа скачком изменялась интерференционная окраска оксида на поверхности. В ряде случаев наблюдалось чередование областей поверхности с неупорядоченным рельефом и пространственным масштабом ~ 1 мкм, и лучевой структурой с масштабом ~ 1 мкм. Это наблюдалось в небольшом интервале плотностей мощности излучения $(1,35-1,5) \cdot 10^5$ Вт/см², верхнему пределу которого отвечало плавление



поверхности. Мелкомасштабный рельеф наблюдался в светлом и темном поле; его контраст был выше в темном поле.

В опытах наблюдалось искажение формируемых структур при изменении характера распределения излучения в пятне. Наряду с облучением в фокальной плоскости оптической системы (аксиально симметричная зона воздействия) использовался проекционный способ облучения, при котором зона воздействия представляла собой прямоугольник (с отношением сторон 1:6). В этом случае как крупномасштабный, так и мелкомасштабный рельеф представляли собой линейные структуры, волновой вектор которых (\vec{g}) был параллелен большой оси пятна; вблизи малой стороны пятна полосы веерообразно расходились. При этом для высоких q была хорошо заметна переходная зона между крупными и мелкими структурами, а при приближении к большой стороне наблюдался распад линейного мелкомасштабного рельефа на блоки и их значительная разориентация, с переходом в неупорядоченный рельеф и далее в крупномасштабные структуры.

Изменение ориентации образующихся структур с изменением типа симметрии пятна облучения, скорее всего, свидетельствует о влиянии на этот процесс возникающих механических напряжений.

Отметим, что при больших размерах пятна облучения ($2r \geq 2-3$ мм) формирование упорядоченного рельефа происходило, в основном, вблизи периферии зоны облучения. Это, вероятно, связано с характером создаваемого при разогреве излучением поля механических напряжений.

Большая однородность в распределении излучения при использовании проекционной схемы позволила наблюдать в центральной зоне образование, по-видимому, фрактальных структур, сменяющих с ростом q мелкомасштабный рельеф (рис. 1, в). При дальнейшем росте q наблюдалось плавление и катастрофическое разрушение поверхности.

В атмосфере кислорода порог формирования рельефа был несколько ниже, чем на воздухе ($0.72 \cdot 10^5$ Вт/см²), но при этом формировался радиальный рельеф с периодом $d \approx 1$ мкм. При более высоких плотностях мощности радиальные структуры формировались в центре зоны облучения, а на ее периферии возникал кольцевой рельеф большего пространственного масштаба, $d \approx 20$ мкм, рис. 2, имеющий тонкую структуру и состоящий преимущественно из кольцевых образований с $d \approx 1-2$ мкм. Характерно, что в этих облас-

Рис. 1. Микрофотографии рельефа поверхности полированного титана, полученные в темном поле после воздействия излучения импульса свободной генерации лазера на стекле с неодимом в атмосфере воздуха при нормальном давлении и плотности мощности излучения: а - $1.27 \cdot 10^5$ Вт/см², б - $1.4 \cdot 10^5$ Вт/см², в - $1.45 \cdot 10^5$ Вт/см². В атмосфере азота образуется микрорельеф поверхности, аналогичный приведенному на рис. 1, а.

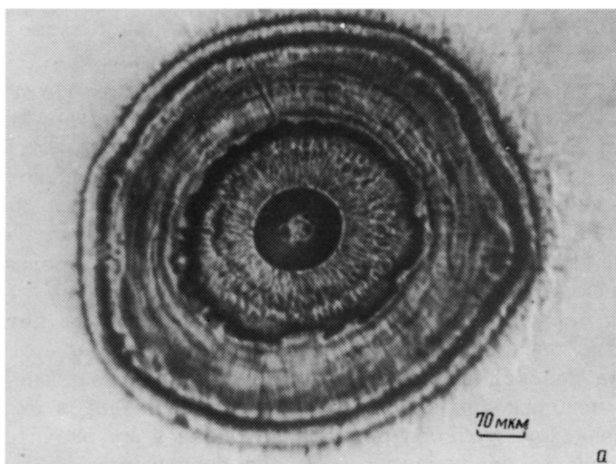


Рис. 2. Микрорельеф на поверхности анодированного титана, сформированный под действием излучения импульса свободной генерации неодимового лазера в атмосфере кислорода при нормальном давлении и плотности мощности $q = 1.4 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$: а - общий вид, б - зона кольцевых структур с большим увеличением.

тах наблюдалась конкуренция мелкого радиального и кольцевого рельефа. В ряде областей наблюдался переход мелкого радиального рельефа в неупорядоченный с характерным масштабом $\approx 1 \text{ мкм}$.

При $q = 0.85 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ в центре зоны воздействия возникал конусообразный выступ, высота которого при $q = 1.3 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ достигала 0,1 мм.

В атмосфере гелия и водорода структур описанного выше типа на поверхности титана не наблюдалось; при сравнительно высоких ρ становились заметны границы зерен рекристаллизации, вытянутых в радиальном направлении. В пределах некоторых из них возникал неупорядоченный рельеф.

Обсуждая причины формирования наблюдаемого твердофазного поверхностного рельефа, особо отметим экспериментально установленную роль окислительной атмосферы, а также величину деформации поверхности металла ~ 1 мкм. Из литературы хорошо известно [5], что при нагреве и достаточно быстром охлаждении в металлах могут быть заморожены значительные концентрации неравновесных вакансий. Характерные времена релаксации вакансий при высоких температурах (ниже точки плавления) в металлах составляют ~ 1 мс. Кроме того, процесс высокотемпературного ($T > 1200$ К) окисления титана при диффузии катионов металла через окисел [6] идет с образованием в титане неравновесных вакансий [7], концентрация которых максимальна на границе раздела металл-окисная пленка. При высоких скоростях охлаждения этот процесс приводит к дополнительному увеличению концентрации вакансий, зависящему от скорости окисления.

С учетом представлений, развитых в [8], нами предлагается деформационно-химический (вакансионно-деформационно-химический) механизм формирования упорядоченного и неупорядоченного рельефа. Наряду с термической генерацией вакансий, в нем предполагается генерация неравновесных вакансий в результате реакции окисления металла. При этом возникновение крупномасштабных структур связывается с вакансионной неустойчивостью, развивающейся по следующему механизму. Появление флуктуации растягивающего напряжения вызывает увеличение скорости генерации вакансий (вследствие зависимости энергии их образования от механических напряжений), что, в свою очередь, приводит к росту создаваемых ими растягивающих напряжений и замыкает цепочку положительных обратных связей. При этом в областях повышенной концентрации вакансий можно ожидать увеличения скорости окисления, что согласуется с экспериментом: окисел толще на выступах рельефа.

Формирование мелкомасштабного рельефа также может быть связано с возникновением неустойчивости концентрации вакансий, при их деформационно-индуцированном дрейфе.

Измеренные значения высоты крупномасштабного рельефа (~ 1 мкм) прямо свидетельствуют о том, что он возникает на поверхности металла, поскольку толщина образующейся в таких условиях окисной пленки не превышает 0,1 мкм. Вопрос о том, в каком слое образуются мелкомасштабные структуры, остается открытым. Действительно, нельзя исключить и возможность возникновения упорядоченных структур в формирующихся окисных слоях, поскольку, например, в TiO_2 экспериментально обнаруженная концентрация вакансий в подрешетке титана и кислорода достигала 15% [9].

В приведенных экспериментах наблюдалось самопроизвольное формирование рельефа под действием лазерного излучения. Готовится эксперимент по формированию рельефа в условиях, когда периодическая решетка напряжений создается интерференционным полем на поверхности металла.

Изложенные представления относятся, по-видимому, к образованию рельефа при нагреве поверхности не только лазерным излучением, но и иными источниками энергии.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б о н ч-Б р у е в и ч А.М., К о ч е н г и н а М.К., Л и - б е н с о н М.Н., М а к и н В.С., П у д к о в С.Д., Т р у б а е в В.В. // Известия АН СССР, сер. физич., 1982. Т. 46. В. 6. С. 1186-1193.
- [2] С п е в а к И.С., К о н т о р о в и ч В.М., К а ц А.В., Г а в р и к о в В.К. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. В. 1. С. 104-117.
- [3] П р о х о р о в А.М., К о н о в В.И., У р с у И., М и - х а и л е с к у И.Н. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М.: Наука, Bucuresti, Editura Academiei, 1988. 537 с.
- [4] В а s t o w Т.Ж. // Nature. 1969. V. 222. N 5198. P. 1058-1060.
- [5] Б о б ы р е в В.А., Б о й к о В.И., Б у н к и н Ф.В., Л у к ь я н ч у к Б.С., Ц а р е в Е.Р. // Изв. АН СССР, сер. физич. 1987. Т. 51. В. 6. С. 1180-1192.
- [6] Л а з а р е в Э.М., К о р н и л о в а З.И., Ф е д о р - ч у к Н.М. Окисление титановых сплавов. М.: Наука, 1985. 140 с.
- [7] S a n f e l d A., H e n n e n b e n g M., B e r t - r a n d G., C a n n o t J.C. // Corrosion Science. 1988. V. 28. N 12. P. 1163-1176.
- [8] Е м е л ь я н о в В.И., М а к и н В.С., У в а р о - в а И.Ф. // Физ. хим. обраб. материалов. 1990. № 2. С. 12-19.
- [9] Н о r m a n d i n g e r G., R e d i n g e r J., W e i n b u g e r P. // Sol. Svata. Comm. 1988. V. 68. N 5. P. 467-470.

Поступило в Редакцию
24 июля 1990 г.