

4. Жарин А.Л., Шипица Н.А., Сарока Д.И. Метод исследования поверхности металлов методом Кельвина // 4-й Белорусский семинар по сканирующей зондовой микроскопии: Сборник докладов. Гомель. 24-25 октября 2000г С. 22-26.
5. Генкин В.А., Жарин А.Л., Шипица Н.А., Дмитриевич А.Л., Фишбейн Е.И. Экспериментальное определение деформации материалов // В кн.: Механика и физика разрушения хрупких материалов. Киев. 1990 г. с.148- 153.
6. Минц Р.И., Мелехин В.П., Партенский М.Б. Деформационное изменение работы выхода электрона. //ФТТ. 1974. Т. 16. № 12. С. 3584-3586.
7. Андреев А.А., Галаев А.А. Исследование поверхности деформированного молибдена методом измерения работы выхода электрона. //ФХММ. 1970. Т. 6. № 6. С. 19 - 24.
8. Крейг, Радека. Исследование зависимости КРП металлов от механического напряжения методом Кельвина. //Приборы для научных исследований. 1970. № 2. С. 99 - 105.
9. Партенский М.Б. Изменение энергии Ферми металлических кристаллов обусловленная дислокациями. // Физика металлов и металловедение, 1971, т.32, № 3, с.510-514.

УДК 539.8

## К ВОПРОСУ ДИНАМИЧЕСКОГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Андрушевич А. А.<sup>1)</sup>, Ушеренко С. М.<sup>2)</sup>, Шипица Н. А.<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> *Институт импульсных процессов НАНБ,*

<sup>2)</sup> *Институт повышения квалификации и переподготовки кадров,*

<sup>3)</sup> *Институт порошковой металлургии НАНБ, Минск, Беларусь*  
[shipitsa\\_nik@mail.ru](mailto:shipitsa_nik@mail.ru)

### Введение

Процессы импульсного нагружения различных материалов исследовались в течение многих сотен лет. Это было связано, в основном, с использованием этих результатов для военного применения. С 19-го века интенсивно стали развиваться промышленные технологии, обеспечивающие объемное деформирование заготовок различных материалов. В числе прочих изучались процессы объемного деформирования и перестройки структуры за счет энергии различных взрывчатых веществ. Были проведены экспериментальные и теоретические исследования и получены основополагающие зависимости. Однако появление ряда необычных научных результатов в этой области, таких, например, как динамический массоперенос и сверхглубокое проникновение, показало, что с изменением механизмов массопереноса эти зависимости не могут претендовать на всеобщность. Процесс сверхглубокого проникания (СГП) реализуется в условиях коллективного воздействия потока микроударников на преграды и приводит к разрушению известного барьерного ограничения [1]. Так как этот процесс относится к ударным, то в качестве критерия его оценки используется относительная глубина кратерообразования. Известно барьерное ограничение кратерообразования при ударе составляет величину 10 –12 определяющих размеров ударника (калибров). В условиях СГП стабильно регистрируются относительные глубины  $10^2$ - $10^4$ . Такой результат может быть получен при качественном изменении механизма массопереноса. Соответст-

венно, есть все основания предполагать, что существенным образом должен изменяться механизм поглощения энергии удара и структурообразование.

### Постановка и проведение экспериментальных исследований

Был выполнен цикл экспериментов по обработке цилиндрических литых заготовок из алюминия и его сплавов с кремнием и цинком. В качестве рабочих схем импульсного нагружения использовались два варианта: схема с обжатием зарядом взрывчатого вещества по цилиндрической поверхности заготовки (время воздействия до 20 мкс) и схема введения порошкового материала в торец заготовок в режиме СГП (время воздействия до 400 мкс). В первом варианте использовали кольцевой заряд взрывчатого вещества из аммонита №6ЖВ массой 2 кг, а во втором – цилиндрический заряд из того же вещества массой 0,2 кг. В качестве метаемого рабочего вещества по схеме с реализацией СГП использовали порошки SiC фракции 50 – 100 мкм. Соответственно энергии, вводимые в материал в первом и во втором варианте, отличались между собой примерно на порядок. Образцы после обработки разрезались в продольном и поперечном направлении, приготавливались шлифы.

Изменение состояния образца, подвергнутого обработке, оценивалось по регистрации распределения работы выхода электрона и твердости по поверхности шлифа.

Распределение работы выхода электрона регистрировалось методом Кельвина, в котором измерения осуществляются по контактной разности потенциалов между исследуемой и стабильной поверхностью эталонного образца [2].

Результаты регистрации топологии работы выхода электрона приведены на рис. 1-3, а результаты измерений твердости в алюминии и его сплавах показаны в таблице

**Таблица.** Свойства алюминиевых сплавов до и после импульсной обработки.

Материал	Состояние	Твердость (на глубине 20-30 мкм) НВ	Предел прочности $\sigma$ МПа	$\delta$ , %
Al-12%Si	Литой	107	250,0	3,2
Al-12%Si	После СГП	136	287,0	2,5
Al-15%Zn	Литой	95	306,9	10,2
Al-15%Zn	После СГП	95	169,2	8,3

### Обсуждение полученных экспериментальных результатов

Изучение напряженного состояния проводилось на основе анализа топологии работы выхода электрона с поверхности образцов, а также сопоставлением с результатами по замерам твердости. Измерение проводилось путем регистрации изменений контактной разности потенциалов между эталонным образцом и поверхностью (метод Кельвина). Известно, что топология работы выхода электрона существенно зависит от состояния поверхности образца, в частности от плотности дефектов (дислокаций, вакансий, и т.п.) и напряженного состояния. Анализ экспериментальных результатов (см. таблицу, рис. 1-3) показывает, что распределение работы выхода электрона с макрошлифов имеет качественные отличия в зависимости от вида обработки. Топология работы выхода электрона поверхности литого образца, который принят в качестве эталонного, является однородной с небольшими флуктуациями, случайно распределенными по поверхности образца (рис. 1).

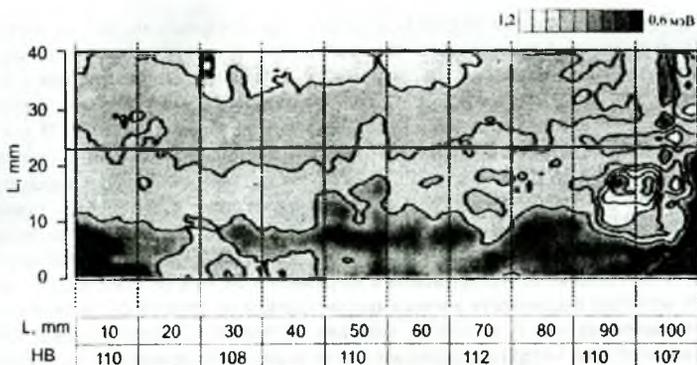


Рис. 1 - Топология работы выхода электрона поверхности макрошлифа литого образца

Для образцов, подвергнутых обжатию кольцевым зарядом, характерно понижение работы выхода электрона в середине нагруженного образца (рис.2). Это, по-видимому, подтверждает известный факт схождения ударных волн по оси и соответственно возрастание дефектности в этой макро зоне.

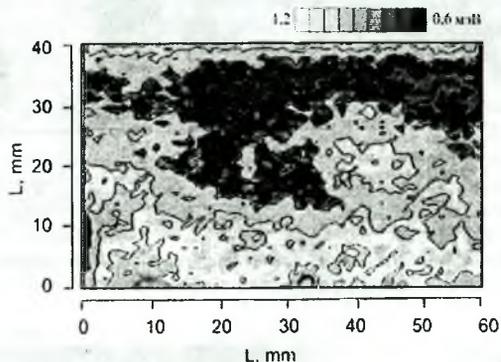


Рис. 2 - Топология работы выхода электрона поверхности макрошлифа образца подвергнутого обжатию

Эти результаты качественно отличаются от изображения приведенного на рис. 3. В результате обработки потоком порошковых частиц в центральной части образца наблюдается заметное повышение работы выхода электрона.

В работе [3] в результате исследования процесса СГП, выполненного с использованием нейтронно-активационного анализа, показано, что плотность канальных зон (плотность трековой картины) в центральной части обработанного образца существенно возрастает. Очевидно, что увеличение плотности такого рода дефектов должно было привести к уменьшению работы выхода электрона (аналогично наблюдавшемуся в предыдущем варианте). Однако в эксперименте мы наблюдаем качественно другой результат. Кроме того, при данной обработке характерно появление чередующихся зон структур в продольном направлении с повышенной и пониженной работой выхода электрона. Наблюдаемые зоны вытянуты перпендикулярно к боковой поверхности образца. В

работе [4] при исследованиях стальных образцов, обработанных по той же схеме, на боковой поверхности в точках выхода этих необычных структурных зон была зарегистрирована интенсивная засветка пленочных датчиков. Исследования образцов с помощью измерения твердости также позволяет регистрировать необычную структуру (рис.3.). Анализ изменения твердости в результате использования схемы СГП для различных алюминиевых материалов показал, что выбранный порошковый состав имеет существенное значение и, по-видимому, должен выбираться конкретно к каждому составу. Введение потока порошков SiC в алюминиевый сплав с Si позволил повысить твердость обрабатываемой заготовки на процент, а введение того же порошкового состава в сплав с Zn привел к противоположному результату (понижение твердости на процент). Дополнительные эксперименты с введением в сплав с алюминием с Si потока частиц Pb позволил рассмотреть anomальные результаты по твердости материала создаваемых канальных зон. В частности, введение частиц SiC в сплав позволило образовать в канальной зоне материал с твердостью на порядок более высокой по сравнению с исходным матричным материалом.

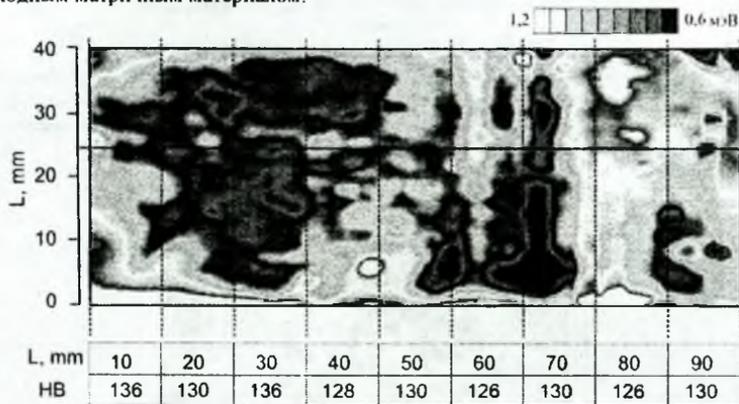


Рис. 3 - Топология работы выхода электрона поверхности - макрошриффа образца обработанного в режиме СГП



Рис. 4 - Структура шлифа образца обработанного частицами SiC

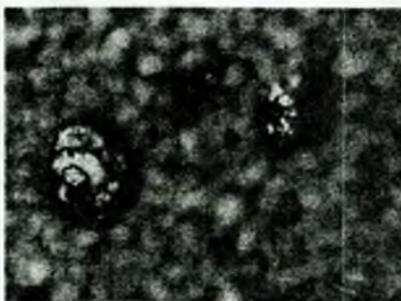


Рис. 5 - Структура шлифа образца обработанного частицами Pb

На рис. 4 показана структура такой канальной зоны. На рис. 5 показана аналогичная канальная зона, полученная в результате введения в этот алюминиевый сплав Рb. Травимость этой зоны на порядок ниже, чем у исходного материала. Таким образом, очевидно, что импульсная обработка алюминия и его сплавов в режиме сверхглубокого проникания, в отличие от обычной ударно-волновой обработки, формирует специфическую анизотропную структуру композиционного материала, армированную длинномерными канальными зонами, образованными в результате взаимодействия вводимого и матричного материалов. Выполненное сопоставление размеров зерен алюминиевых сплавов, полученных в результате использования двух рассмотренных вариантов импульсной обработки, показало, что в обоих случаях они одинаковы, т.е. на 30 – 50% меньше, чем у материала до нагружения.

### Заключение

В результате исследования алюминия и его сплавов, подвергнутых воздействию импульсных нагрузок по двум различным схемам: обжарки кольцевым зарядом (время нагружения до 20 мкс) и соударения со ступком порошковых частиц в режиме СГП (время воздействия до 400 мкс), выявлены качественные особенности структурообразования и сделаны следующие основные выводы:

В результате импульсного воздействия по обоим схемам получен одинаковый размер зерен алюминия и его сплавов при разнице в затрачиваемой энергии в 10 раз;

Полученные картины распределения работы выхода электрона по продольному сечению нагружаемого металлического тела качественно отличаются в зависимости от варианта нагружения;

Полученные результаты измерения твердости по сечению образцов показывают соответствие с картиной распределения работы выхода электрона;

В варианте импульсного нагружения (в режиме СГП) кроме измельчения зерен наблюдается также возникновение объемной армировки нагружаемого металлического тела. Это происходит за счет канальных новообразований, центральная часть которых состоит из продуктов взаимодействия вводимого и матричного вещества;

Согласуя введение того или иного вещества в заданный алюминиевый сплав, можно осуществлять как упрочнение, так и разупрочнение материала заготовки, менять уровень электрохимического потенциала, образуемой канальной зоны.

### Список литературы

1. Ушеренко С.М. Современные представления об эффекте сверхглубокого проникания /Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75, №3. –С183-198.
2. Жарин А.Л., Шипица Н.А., Сарока Д.И. Метод исследования поверхности металлов методом Кельвина // 4-й Белорусский семинар по сканирующей зондовой микроскопии. Сборник докладов. Гомель. 24-25 октября 2000 г. С. 22-26.
3. Andilevko S K., Roman O V., Shilkin V.A. and Usherenko S.M.//J. de Physique 4.Colloque C8. Suppl. au J. de Physique 3. 1994. Vol. 4. Pp. C8-803- C8-807.
4. Ушеренко С.М., Гуцин В.И., Дыбов О.А. Результаты соударения потока микрочастиц с металлической преградой в режиме сверхглубокого проникания / Химическая физика 2002. Т.21, №9. – С.41 – 49.