

## 6 Исследование структур в медной кумулятивной струе с использованием мультифрактального анализа

© Г.Г. Савенков,<sup>1</sup> Б.К. Барахтин,<sup>2</sup> К.А. Рудометкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Специальное конструкторско-технологическое бюро „Технолог“, 190013 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов „Прометей“, 191015 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Открытое акционерное общество „Водтрансприбор“, 197342 Санкт-Петербург, Россия  
email: sav-georgij@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 13 марта 2014 г. В окончательной редакции 17 июня 2014 г.)

Методами световой и электронной металлографии с применением мультифрактального анализа исследованы изменения, произошедшие в структурно-механическом состоянии медной оболочки, деформированной в условиях формирования и растяжения осесимметричной кумулятивной струи.

### Введение

Известно [1], что металл в кумулятивной струе (КС) выдерживает аномально высокие (вплоть до тысячи процентов) пластические деформации до разрыва. Такие высокие значения деформации в основном характерны для состояния структурной сверхпластичности (ССП) при квазистатическом растяжении металлов и сплавов со стабильной ультрамелкозернистой (как правило) структурой при температурах  $T \approx (0.4-0.5)T_m$  ( $T_m$  — температура плавления), сохраняющейся в процессе сверхпластической деформации.

Сформированная в процессе взрывного обжатия металлической облицовки зарядом взрывчатого вещества кумулятивная струя летит с характерными скоростями 1–10 km/s, многократно растягиваясь вдоль своей оси до разрушения на отдельные фрагменты с начальной скоростью деформации  $10^4-10^6 \text{ s}^{-1}$ . Существуют два достаточно близких объяснения природы высокоскоростной сверхпластичности [2,3]. Авторы [2] полагают, что высокоскоростная сверхпластичность связана с локальным плавлением границ зерен при температуре  $T_i < T_S$ , где  $T_S$  — температура солидуса, причем  $T_i$  может существенно отличаться от  $T_S$  за счет отличия химического состава границ и тела зерен, сохранивших равноосную форму.

В [3] аномально высокую пластичность объясняют состоянием особого возбуждения атомов в составе границ раздела (межфазных, межзеренных), куда нагнетается множество дислокаций из объема зерен. Процесс сопровождается локальным разогревом границ и эффектом деформационно-стимулированного увеличения коэффициента зернограницной диффузии. В рамках этой модели предполагается эффективная аккомодация пластических несовместимостей, возникающих в процессе деформации. В конечном результате границы зерен переходят в квазижидкое состояние, облегчая тем самым межзеренное проскальзывание. Размер зерен не должен превышать 0.6  $\mu\text{m}$ . Но экспериментально субструктурные

объекты с такими размерами ни в исходном состоянии металла кумулятивной облицовки, ни в рекристаллизованном состоянии после формирования струи, не наблюдались. Например, по данным [1] в центральной (осевой) части струи были обнаружены зерна размером не менее 0.8  $\mu\text{m}$ , в других объемах размер зерен менялся от 3  $\mu\text{m}$  (в переходной зоне) до 80  $\mu\text{m}$  (у внешней поверхности) с признаками радиальной текстуры. Более полные и достоверные данные об особенностях внутреннего строения металла в объеме кумулятивной струи отсутствуют.

Целью проведенной работы являлось объяснение механизма высокоскоростной СПП на основе определения структурно-механического состояния металла после высокоскоростного деформирования в условиях формирования КС с использованием зондовых методов исследования и мультифрактального анализа изображений.

### Методика и объект исследований

Исследовалось внутреннее строение низкоскоростных хвостовых элементов струи (так называемого песта, в котором сосредоточено до 90% всей массы струи) и прилегающих к ним небольших участков (длиной около 7 mm) основной скоростной части струи. Струя сформировалась в результате взрывного обжатия изготовленной из меди марки М1 с исходным зерном  $38 \pm 13 \mu\text{m}$  конической облицовки заряда ВВ. Максимальный диаметр исследуемого песта составлял 7 mm, максимальный диаметр элементов струи — 3.4 mm.

Пест с элементами струи разрезался по максимальному диаметру алмазным диском поперек и затем вдоль центральной оси, что позволило подготовить образцы (шлифы) и выявить структуру деформированного металла в разных направлениях. Длина шлифа (пест + часть элементов струи) в продольном направлении — 25 mm. Продольные расстояния на рисунках указаны от вертикального сечения песта. Техника подготовки необходимых проб описана в литературе [4] и здесь не рассматривается.

Структурно-механическое состояние металла оценивалось с помощью светового микроскопа „Аффри“ со встроенным микротвердомером. Микротвердость (HV) определяли при нагрузке 50 g. В работе также использовались световой микроскоп „Аксиоверт“, электронный растровый микроскоп „Камскан“ и электронный просвечивающий „Джеол“.

Обработка изображений структур выполнялась методами цифровой металлографии с применением программных пакетов „Эксперт Про“ [5] и „Фрактал“ [6].

## Мультифрактальный подход при описании сложных структур

Мультифрактальный анализ — вариант применения информационных технологий в обработке изображений структур [7]. В его основе лежит статистически-вероятностный способ использования модельных геометрических самоподобных фигур (фракталов) с дробной (нецелой) размерностью. В общем случае метод позволяет обнаруживать особенности распределений свойств объекта на носителях меры, которые вводятся из геометрических, информационных или других соображений [8]. В настоящей работе использовано определение геометрической меры, построенное на математической абстракции практического способа измерения длин, площадей и объемов, когда с помощью программно-вычислительных процедур на измеряемый объект последовательно „набрасываются“ сетки разного масштаба с целью получения количественной зависимости характеристик объекта от масштаба сетки. Введение представлений о пространстве с фрактальной размерностью, которая является интегральной характеристикой структуры материала, оправдано независимостью результатов измерений от величины масштаба наблюдения, и, кроме того, использование методов фрактальной геометрии и мультифрактального подхода расширяет термодинамическое описание среды.

Не вдаваясь в тонкости вычислений, укажем, что в построении геометрической меры групп зерен применено равноячеечное разбиение черно-белой (бинарной) картины, которая представляет собой статистически-геометрическую аппроксимацию (отображение) исходного полутонового изображения и служит его количественным аттестатом.

Процедура анализа состоит из нескольких операций. Вначале исходное полутоновое изображение, полученное с помощью физико-аналитического прибора (светового, электронного микроскопа или др.), преобразуется в черно-белую (бинарную) картину, которая является его геометрической аппроксимацией. Далее бинарная картина рассматривается как результат смешения геометрических фракталов разной размерности. Анализ завершается получением спектра размерностей Реньи, в котором содержится информация о пространственно-топологических свойствах бинарной картины. По аналогии с распространенными способами представления

непрерывных функций с помощью полиномов и рядов спектр Реньи характеризует бинарную картину в виде статистической суммы, составленной из фрактальных множеств разной размерности и входящих в сумму с разным весовым вкладом.

При удовлетворительном соответствии бинарной картины исходному изображению вычисленные мультифрактальные параметры рассматриваются как характеристики исследуемой структуры.

Из набора мультифрактальных параметров в настоящей работе использованы два: пространственная размерность объекта  $D_0$  и „скрытая“ упорядоченность  $\delta$ .

Размерность  $D_0$  является характеристикой бинарной картины (отображения) реальной структуры, чувствительной к „усложнению“ рельефа границ объекта и поэтому применяемой на практике. Данная размерность содержит сжатую количественную информацию о непрерывно меняющемся множестве случайных геометрических конфигураций.

Математически величина  $D_0$  определяет алгоритм заполнения пространства элементарным структурирующим элементом путем его многократного самоподобного воспроизводства в интервале пространственных масштабов. В физическом толковании значения  $D_0$  содержат информацию о метрике и способе формирования изучаемого объекта.

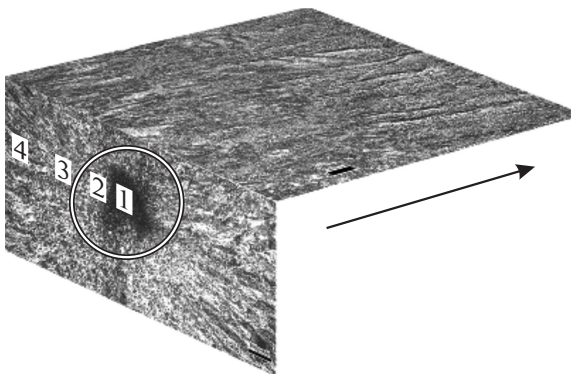
Параметр  $\delta$  содержит статистическую оценку симметрии бинарных объектов с учетом их взаимного расположения. Чем больше (по модулю) величина  $\delta$ , тем более упорядочена структура, или в ней становится больше периодической составляющей. Устремление  $\delta$  к нулю свидетельствует о нарастании хаоса в системе точек отображения, что типично накануне структурного фазового перехода в строении реального материала.

## Результаты металлографических исследований и их обсуждение

Просмотром шлифов установлено, что на поперечных и продольных сечениях песта и элементов струи структура зерен различна. Например, на продольном шлифе песта и струи доминируют неравноосные зерна, ориентированные по направлению растяжения кумулятивной струи, а на поперечном шлифе песта в морфологии зерен зафиксировано несколько зон (рис. 1).

Первая зона (№ 1) в виде своеобразной грибовидной форме размерами  $\sim 200 \times 200 \mu\text{m}$  расположена в центре поперечного сечения, который соответствовал месту пересечения с осью кумулятивной струи. Грибообразная форма, вероятно, обусловлена технологической несимметричностью кумулятивной облицовки заряда [9].

В пределах зоны № 1 рассмотреть структуру зерен не удалось ни в лучах света, ни в лучах вторичных электронов, что связано на наш взгляд с сильным внутренним окислением и аморфизацией строения металла. Указанные факты косвенно свидетельствовали о том, что в результате высокоскоростного сжатия в центре



**Рис. 1.** Структура металла в песте в лучах отраженного света на продольном сечении шлифа и на поперечном сечении вблизи оси. В центре обозначены зоны с различной морфологией зерен. Овал обозначает внешнюю границу зоны № 2. Стрелка указывает ориентацию оси песта. Размер черных меток —  $100\ \mu\text{m}$ .

струи и песта локальная температура приближалась к температуре плавления меди ( $1083^\circ\text{C}$ ), поскольку одним из возможных механизмов перехода кристаллического состояния в аморфную фазу является плавление металла [10]. Аналогичный вывод в отношении температуры центральной зоны песта ( $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ ) был сделан и в работе [11]. В то же время расчетно-экспериментальные оценки усредненных температур дают следующие значения: в песте —  $300\text{--}440^\circ\text{C}$ , в струе  $470\text{--}650^\circ\text{C}$  [12] и  $540\text{--}680^\circ\text{C}$  в струе [13]. В обеих работах материал струй — медь. Из совокупности полученных результатов можно заключить, что температурное поле струи является неоднородным как в осевом, так и в радиальном направлении.

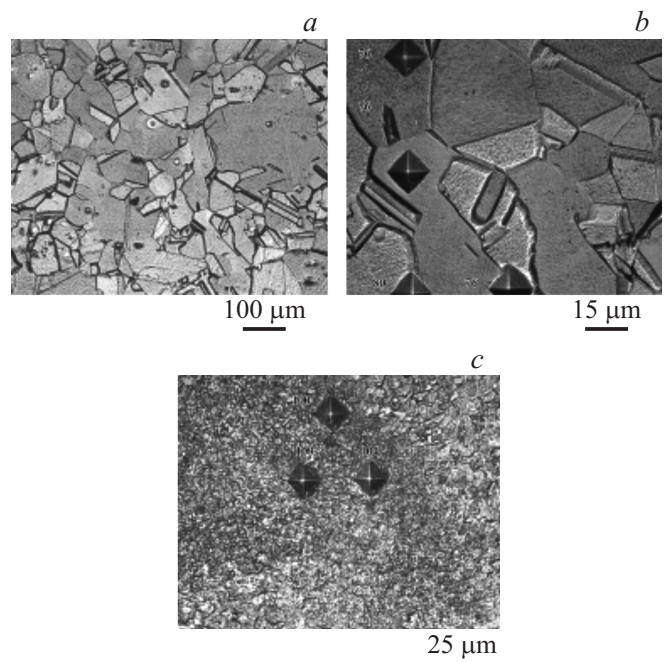
Далее в радиальном направлении от центральной оси струи-песта к периферии вокруг площадки № 1 была выделена вторая зона (№ 2) в форме кольца диаметром до  $400\ \mu\text{m}$ , в пределах которого металл характеризовался микротвердостью  $\sim 0.745\ \text{GPa}$  и с различной степенью равноосности зерен диаметром  $35 + 15\ \mu\text{m}$  (рис. 2 *a, b*). В свою очередь зона № 2 окружена также кольцевой зоной (№ 3) с внешним диаметром до  $650\ \mu\text{m}$ , где в металле в массиве ультрадисперсных равноосных зерен с размерами  $1\text{--}5\ \mu\text{m}$  (рис. 2, *c*) была зафиксирована микротвердость  $1.03 \pm 0.049\ \text{GPa}$ . Следующий участок простирался до внешней поверхности струи-песта. В его пределах структура представлена неравноосными зернами с соотношением сторон  $\sim 1 : 10$ , ориентированными вдоль радиуса от внешней поверхности к центру.

Результаты металлографического анализа свидетельствовали о том, что в условиях высокоскоростного обжата облицовки и пластического течения кумулятивной струи в разных объемах металла происходили изменения с образованием структур разной морфологии, которая определялась напряженно-деформированным состоянием и неоднородным температурным полем. Например, образование ориентированных неравноосных зерен типично для упрочненного предельно фрагментированного

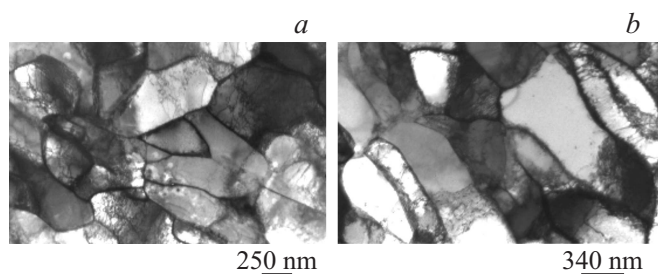
металла после мегапластической деформации [14,15]. Вызванное сжатием и трением о воздух при высокоскоростном движении КС адиабатическое повышение температуры активировало процессы разупрочнения, которые реализовывались работой релаксационных механизмов: динамической рекристаллизации, динамической полигонизации и статической рекристаллизации, что приводило к измельчению зеренной структуры в зоне № 3. По физическому смыслу полученные результаты близки данным, опубликованным в [16].

Последовательность явлений, присущих большим пластическим деформациям, нашла подтверждение в результатах электронно-микроскопических исследований на просвет структуры металла струи-песта. Например, при просмотре фольг в местах, которые соответствовали области перехода от зоны №2 к зоне №3 в поперечном сечении песта (см. рис. 1), зафиксирована дислокационная структура с неравноосными ячейками со средним характерным размером от  $100$  до  $500\ \text{nm}$  (рис. 3), типичная при больших пластических деформациях в условиях фрагментации [15].

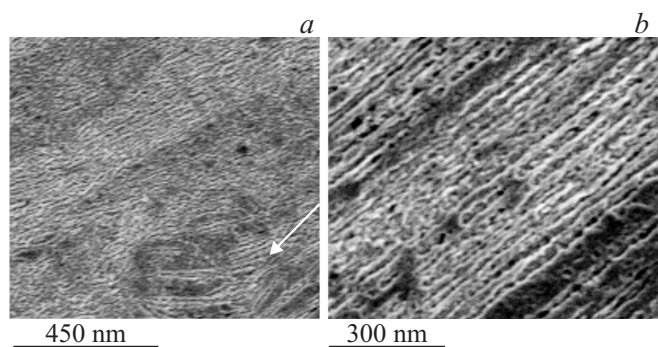
Исследование структуры с помощью электронного растрового микроскопа выявило еще одну особенность пластической деформации кумулятивной струи. Так, структура металла струи, начиная с переходной зоны от песта к элементам струи и далее в осевом направлении струи, имеет четко выраженный каналированный вид (рис. 4). Такая структура является полным аналогом структур материалов, в которых высокоскоростная пластическая деформация осуществлялась в виде совокупности движущихся с различной скоростью относительно друг друга мезопотоков вещества [17]. При этом, как



**Рис. 2.** Зерна и следы замеров микротвердости, зафиксированные на участках № 2 (*a, b*) и № 3 (*c*) поперечного шлифа песта.



**Рис. 3.** Дислокационная структура фрагментированного состояния между зонами № 2 и № 3 (см. рис. 1).



**Рис. 4.** Видимые в лучах вторичных электронов каналы пластической деформации (*a*) в осевом направлении растяжения КС в переходной зоне между пестом и струей (стрелкой указано округлое образование); те же каналы при большем увеличении.

видно из рис. 4, каналы пластической деформации имеют различную по ширине масштабную иерархию: от 1–2 до 20–40  $\mu\text{m}$  и в промежутке 5–10  $\mu\text{m}$ . В некоторых случаях каналы, находясь под углом друг относительно друга (иначе происходит их разориентация относительно оси), образуют округлые структуры, что указывает на турбулизацию пластического течения в форме потоков взаимодействующих мезодефектов кристаллического строения. Поскольку такие образования носят единичный характер, то мы не можем оценить вклад турбулентной моды течения в общий характер пластической деформации КС. Однако можно предполагать, что турбулизация течения влияет на проявление сверхпластических свойств металла при высоких скоростях деформации [18].

## Мультифрактальный анализ структур

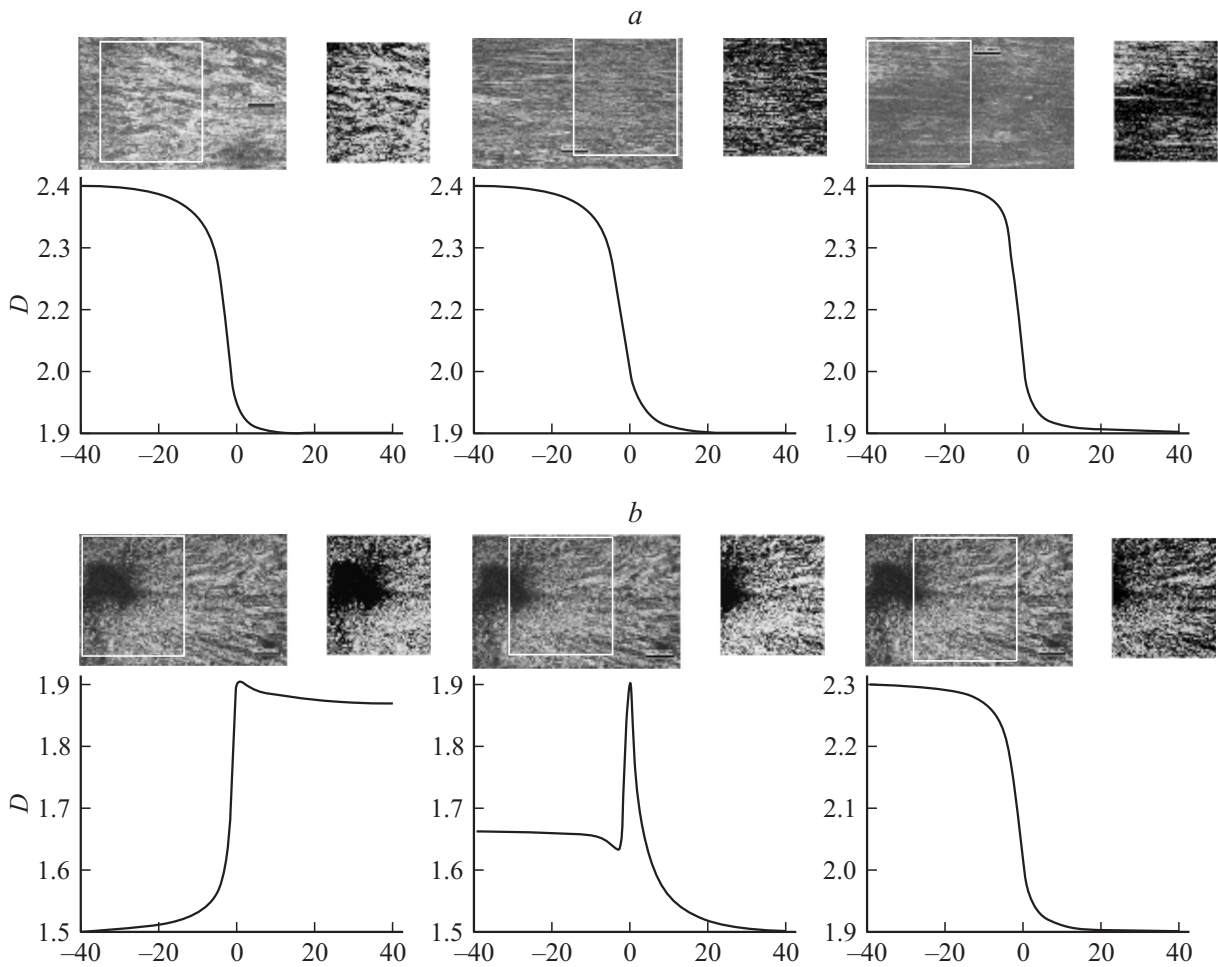
Выявленные особенности внутреннего строения кумулятивной струи обозначили границы объемов, где структурно-механическое состояние деформированной меди определялось работой разных механизмов. Поскольку в условиях высокоскоростного динамического воздействия формирование адекватного структурно-механического состояния металла сопровождается образованием диссипативных структур неравновесного

состояния, выявленные морфологические особенности внутреннего строения классифицированы как статистические частично релаксированные диссипативные автоструктуры. С целью количественной аттестации автоструктур в ансамблях зерен был выполнен мультифрактальный анализ изображений, зафиксированных изображений при оптическом увеличении  $\times 100$  как на продольном шлифе, так и на поперечном.

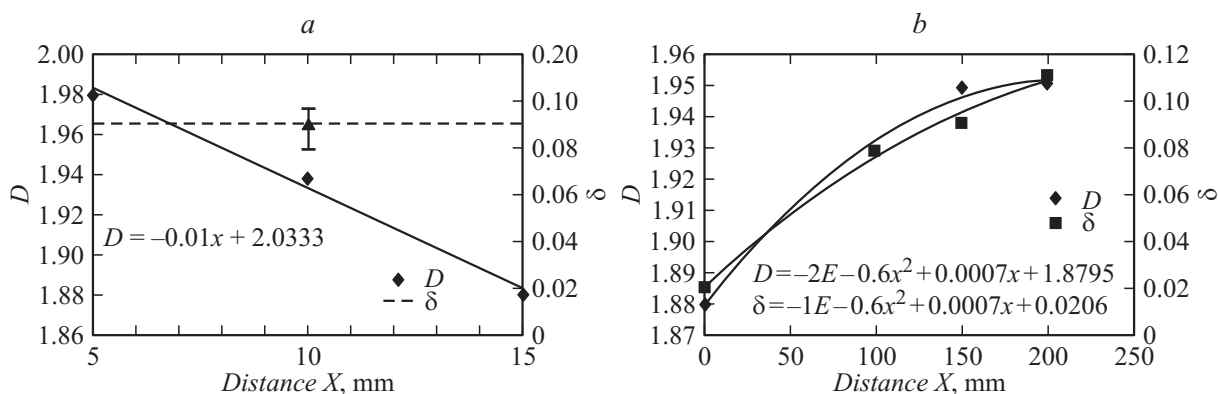
Результаты мультифрактальной обработки изображений показали (рис. 5), что на продольном шлифе структура зерен характеризуется каноническим видом спектра размерностей Реньи. Выбранные характеристики внутреннего строения ( $D_0$  и  $\delta$ ) указывают на монотонное сосредоточение предельно фрагментированных зерен в каналах шириной 5–10  $\mu\text{m}$  ( $D_0 \rightarrow \min$ ), разделенных большеугловыми границами (рис. 6). Видимый различный контраст и „расслоение“ каналов по направлению движения струи позволяют предположить, что пластическая деформация происходила с разной скоростью в разных каналах (о чем уже говорилось выше) с состоянием металла, близким к структурно-фазовому переходу ( $\delta = 0.09 \pm 0.03 \rightarrow 0$ ). В этом случае контраст может быть связан с потерей устойчивости кристаллической решетки металла облицовки и зарождением локальных сдвигов, которые и приводят к расслоению каналов.

Внутреннее строение струи, выявленное на шлифе поперечного сечения, обнаруживает признаки структурно-фазового перехода. Так, расположение аналитической рамки в зоне 1 с грибообразным пятном сопровождается преобразованием канонического спектра Реньи в псевдоспектр. На границе между зонами 1 и 2 спектр размерностей представляет собой „острый моновсплеск“ при  $D_0 = 1.93$ , а по мере удаления от пятна спектр Реньи возвращается к каноническому виду. Математические причины обнаруженного преобразования спектров пока не ясны, но можно предположить, что они вызваны сменой кодировки статистической меры вследствие изменения контраста исходного изображения. Изменение мультифрактальных параметров  $D_0$  и  $\delta$ , вычисленных для изображений, отстоящих от границы зоны 1, указывает на структурно-фазовый переход, связанный с образованием неустойчивых возбужденных областей и в конечном итоге с изменением агрегатного состояния вещества:  $\delta \rightarrow 0$  и  $D_0 \rightarrow \min$ .

При возбужденном состоянии и соответственно при структурно-фазовом переходе, которые происходят за очень короткие отрезки времени, наблюдается взаимодействие структур различного уровня, материал находится в состоянии, далеком от равновесия, при котором наблюдается его качественная перестройка и скачкообразное изменение как свойств материала, так и его агрегатного состояния. Напомним, что существенное изменение всего комплекса физико-механических свойств является одним из основополагающих факторов перехода материала в сверхпластическое состояние [19]. В момент перехода система, в нашем случае — материал, находится в таком состоянии, когда по словам



**Рис. 5.** Примеры экрана ПК ЭВМ при обработке изображений программой „Фрактал“ с показом исходного изображения с наложенной аналитической рамкой, бинарного отображения, спектра Реньи с результатами расчетов мультифрактальных параметров: *a* — зерна на продольном шлифе длиной 25 mm при удалении от поперечного сечения шлифа (по максимальному диаметру песта) на 5, 10 и 15 mm, *b* — зерна на поперечном шлифе в зонах 1, 2 и 4.



**Рис. 6.** Изменения мультифрактальных параметров ( $D_0$  и  $\delta$ ) для изображений структуры зерен на продольном — *a* и поперечном — *b* шлифах.

И. Пригожина [20], она (он) оказывается одновременно всем, чем она (он) может быть.  
 Таким образом, можно предполагать, что материал струи, являющийся термодинамически неравновесной

фрактальной средой с  $D_0 \approx 1.93$ , переходит в частичное гидродинамическое или полное аморфизованное состояние с резко увеличенными деформационными свойствами. Такие состояния позволяют получить металлу струи

сверхпластические свойства. Сделанное предположение согласуется с результатами исследования аналогичной высокоскоростной деформированной струи, выполненного на основе реологических представлений о явлении сверхпластичности [21].

## Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Методами металлографии с использованием световой и электронной просвечивающей и растровой микроскопии определено структурно-механическое состояние деформированной меди после высокоскоростного обжатия кумулятивной облицовки заряда ВВ и формирования и последующего растяжения кумулятивной струи.

2. С привлечением мультифрактального анализа изображений структур установлено, что в условиях формирования и растяжения струи в металле происходят структурно-фазовые переходы с изменением морфологии, топологии и симметрии структурных объектов внутризеренного (мезоскопического) масштаба.

3. По направлению движения струи из предельно фрагментированных зерен формируются каналы пластической деформации, в которых пластическое течение реализуется с различной скоростью.

4. В поперечном сечении кумулятивной струи вследствие сильного сжатия и повышения температуры в мезоструктуре зерен происходит структурно-фазовый переход с частичным переходом в гидродинамическое и полное аморфизованное состояния металла, что приводит к его сверхпластическому поведению.

## Список литературы

- [1] Тришин Ю.А. Физика кумулятивных процессов. Новосибирск: ИГД, 2005.
- [2] Краснощечков Ю.И., Кузнецов Л.К., Переверзнецов В.Н. и др. // ДАН СССР. 1990. Т. 312. № 4. С. 872–875.
- [3] Переверзнецов В.Н. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 12. С. 140–143.
- [4] Барахтин Б.К., Немец А.М. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения. СПб: НПО „Профессионал“, 2006. 490 с.
- [5] Барахтин Б.К., Обуховский В.В. // Вопросы материаловедения. 1995. № 1. С. 7–17.
- [6] Барахтин Б.К., Чашиников В.Ф. // Вопросы материаловедения. 2001. № 4 (28). С. 5–8.
- [7] Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Ижевск: НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001.
- [8] Колмаков А.Г., Солнцев К.А., Витязь П.А. и др. // Материаловедение. 2012. № 9. С. 37–45.
- [9] Физика взрыва. Т. 2 / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002.
- [10] Павлов В.А. // Физика металлов и металловедение. 1985. Т. 59. Вып. 4. С. 629–649.
- [11] Дильдин Ю.М., Колмаков А.И., Ладов С.В. Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана № 387. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1982. С. 54–59.
- [12] Васюков В.И., Дильдин Ю.М., Колмаков А.И., Ладов С.В. // Вопросы физики взрыва и удара. Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана № 358. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1981. С. 54–63.
- [13] Пай В.В., Кузьмин Г.Е. // ФГВ. 1994. № 3. С. 92–95.
- [14] Глезер А.М., Поздняков В.А. // Деформация и разрушение материалов. 2005. № 4. С. 9–15.
- [15] Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986.
- [16] Murr L.E., Shih H.K., Niou C-S., Zernow L. // Scripta Met. et Mater. 1993. V. 29. № 4. С. 567–572.
- [17] Савенков Г.Г., Мещеряков Ю.И., Барахтин Б.К. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 136–141.
- [18] Ханнанов Ш.Х. // Дисклинация и ротационная деформация твердых тел. Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1990. С. 215–224.
- [19] Соснин О.В., Горев Б.В., Любашевская И.В. // ПМТФ. 1996. Т. 38. № 2. С. 140–145.
- [20] Glansdorff P., Prigogine I. Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations. NY: Wiley, 1971.
- [21] Барахтин Б.К., Савенков Г.Г. // Вопросы материаловедения. 2010. № 4 (64). С. 60–65.