

05;12

Фрактальные характеристики поверхности пластически деформированного композита карбид вольфрама–железомарганцевая сталь

© И.Н. Севостьянова, С.Н. Кульков

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021 Томск, Россия
e-mail: kulkov@ms.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 22 мая 2002 г.)

Проведено исследование эволюции структурных изменений, происходящих в композите WC–сталь 80Г4 процессе его активного нагружения сжатием. Исследован деформационный рельеф, возникающий на поверхности, определены его фрактальные свойства. Показано, что значения фрактальной размерности профиля деформируемой поверхности зависят от среднего расстояния между полосами локализованной деформации и параметров тонкой кристаллической структуры материала.

Введение

Процесс деформации почти всегда сопровождается появлением рельефа на поверхности материалов, формирование которого наблюдается как в пластичных, так и в малопластичных металлах и сплавах, например, таких как твердые сплавы. Однако исследований, направленных на его изучение и определение связи со структурными особенностями хрупких материалов, очень мало. Перспективным методом оценки рельефа, возникающего на поверхности материалов при деформации, является анализ профиля сигнала вторичных электронов, вышедших с поверхности исследуемого объекта, в растровом электронном микроскопе [1–4], поскольку количество вторичных электронов однозначно связано с рельефом исследуемой поверхности. Деформационный рельеф, возникающий на поверхности материалов, кроме того, является результатом изменений, протекающих на разных масштабных уровнях. В частности, для композиционного материала WC–сталь 80Г4 в [4] было показано, что фрактальная размерность (D_m), измеренная на разных масштабных уровнях, линейно зависит от микроструктурных параметров связующей фазы — областей когерентного рассеяния и микронапряжений кристаллической решетки. Однако исследований связи между параметрами тонкой кристаллической структуры, входящих в композит фаз, и фрактальными характеристиками поверхности изучено не было.

Целью данной работы является определение фрактальной размерности участка поверхности, ее изменение при нагружении и установлении связи с микро- и макропараметрами структуры композиционного материала.

Материалы и методы исследования

В работе изучен композиционный материал WC–сталь 80Г4 с содержанием 80% упрочняющей фазы. Технология получения твердого сплава описана в работе [5].

Средний размер карбидного зерна композита составлял $2.4 \pm 0.2 \mu\text{m}$, а средний размер межкарбидных прослоек равен $1.2 \pm 0.2 \mu\text{m}$, пористость при этом не превышала 0.5%. Исследования проводились на образцах прямоугольного сечения $0.004 \times 0.005 \text{ (m)}$ и высотой 0.007 m с полированной боковой гранью. Проводилось ступенчатое (через 100 МПа) нагружение образцов на установке INSTRON-1185 вплоть до разрушения. После каждой степени нагружения образец разгружали и проводили исследование структуры на разных масштабных уровнях и рельефа деформируемой поверхности. Металлографический анализ проводили с помощью оптического микроскопа НЕОРНОТ-21 в прямом и косом освещении. Среднее расстояние между полосами локализованной деформации определяли методом секущих [6]. Рентгеноструктурный анализ проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-УМ1 в фильтрованном CuK_α излучении. Размер областей когерентного рассеяния (CDD) определялся по отражениям ближнего порядка (111) γ -фазы и (100) WC, а микроискажения кристаллической решетки — по отражениям дальнего порядка (222) γ -фазы и (300) WC в предположении, что на ближних углах основной вклад в уширение дифракционных максимумов вносят размеры областей когерентного рассеяния, а на дальних — микроискажения кристаллической решетки [7]. Рельеф деформируемой поверхности анализировался путем определения фрактальной размерности (D_f) с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-200 с ускоряющим напряжением 30 kV в соответствии с методикой [2].

Результаты и обсуждение

Металлографическое исследование эволюции изменений, происходящих на поверхности композита WC–сталь 80Г4, в процессе нагружения сжатием показало, что в области напряжений 0–600 МПа в структуре не происходит видимых изменений. При уровне напряже-

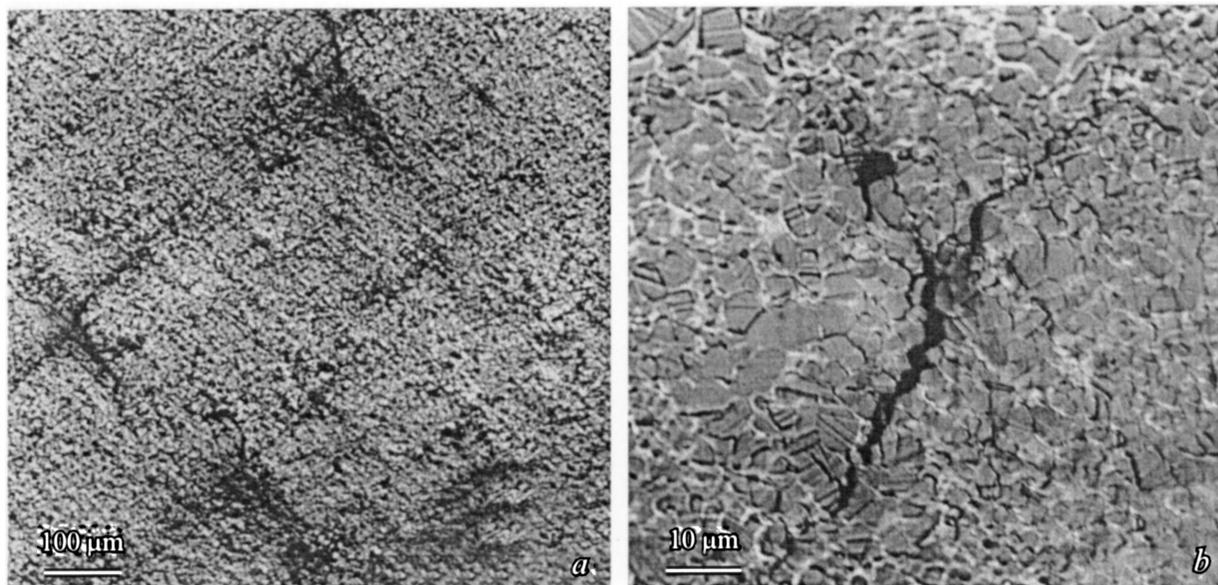


Рис. 1. Металлографическое изображение полос локализованной деформации на поверхности твердого сплава (*a*) и образование макротрещин в местах пересечения полос локализованной деформации (*b*).

ний от 700 до 1700 МПа одновременно наблюдаются два процесса: деформация отдельных, крупных участков связки, проявляющихся в виде рельефа между карбидными зёрнами, и появление на некоторых крупных карбидных зёрнах полос скольжения. На данном этапе нагружения происходит совместная пластическая деформация карбидных зёрен и связующей фазы без нарушения сплошности материала. В области напряжений 1700–2200 МПа на поверхности композита происходит увеличение количества пластически деформированных карбидных зёрен, при этом в процесс пластического течения вовлекаются зёрна меньшего размера. Наблюдается активная деформация связующей фазы в узких межкарбидных прослойках. Наряду с деформацией структурных составляющих появляются единичные трещины (размером с карбидное зёрно), которые располагаются преимущественно по границе раздела карбид–связка, при этом они хаотично распределены по поверхности композита. Увеличение напряжений до 3000 МПа, приводит к возрастанию количества трещин и количества деформированных карбидов.

В области напряжений 3000–3900 МПа на поверхности композита наблюдается локализация пластической деформации в виде полос (рис. 1, *a*). Они представляют собой области с большим количеством деформированных (со следами скольжения) карбидных зёрен, а также сильно деформированной связующей фазой. Кроме того, в полосах локализованной деформации наблюдаются процессы слияния трещин, располагающихся по границе раздела карбид–карбид, карбид–связка. При глубоких степенях деформации наблюдается разрушение отдельных карбидных зёрен, причем разрушаются, как правило, крупные частицы. Полосы ориентированы в двух направ-

лениях и распространяются независимо от внутренней структуры материала в направлении максимальных касательных напряжений под углом примерно 45° к оси нагружения. Их длина варьируется в широких пределах — от $20\ \mu\text{m}$ до $4\ \text{mm}$, а ширина составляет $5\text{--}10\ \mu\text{m}$, т.е. 2–4 размера карбидного зёрна.

Первоначально формируются полосы локализованной деформации, расстояние между которыми составляет $300\text{--}700\ \mu\text{m}$. Их длина сопоставима с размерами образца, а ширина увеличивается по мере развития пластической деформации. Между этими крупными полосами происходит образование новых полос локализованной деформации меньшей длины. Их взаимное пересечение приводит к фрагментации всей поверхности деформируемого образца. Перед разрушением композита основные повреждения накапливаются в нескольких сопряженных полосах, длина которых сопоставима с размерами образца. При их пересечении наблюдается образование макротрещин размером от 40 до $150\ \mu\text{m}$ (рис. 1, *b*), ориентированных в направлении полос локализованной деформации. Эти макротрещины являются предвестниками разрушения твердого сплава.

На рис. 2 (кривая 1) показано изменение среднего расстояния между полосами локализованной деформации в зависимости от остаточной деформации. Металлографический анализ макрокартины показывает, что до 3.5% остаточной деформации происходит интенсивное образование полос локализованной деформации, что приводит к уменьшению расстояния между ними. На последних этапах нагружения композита деформация структурных составляющих, а также процессы предразрушения в виде образования и слияния трещин по границе раздела фаз, разрушение карбидов происходят

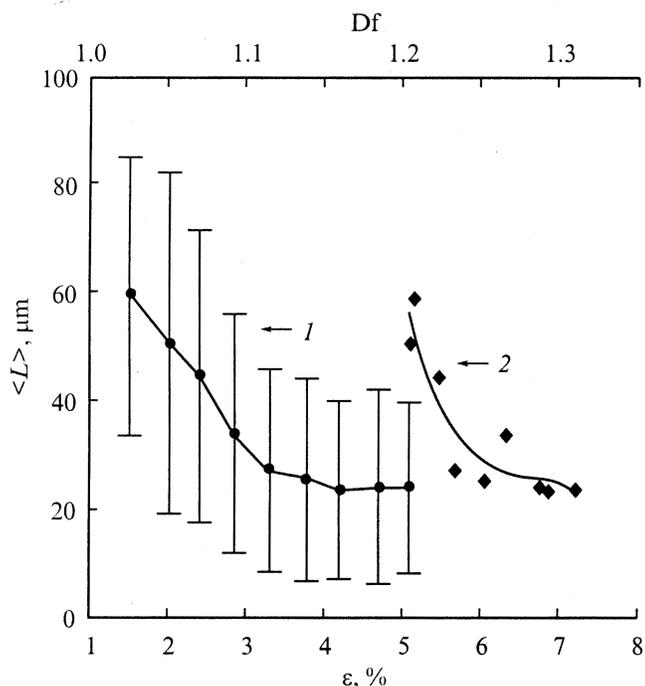


Рис. 2. Изменение среднего расстояния между полосами локализованной деформации в зависимости от остаточной деформации (1) и фрактальной размерности (2).

в нескольких сопряженных полосах, имеющих на поверхности более выраженный рельеф. Т.е. новых полос не образуется, а катастрофическая трещина, приводящая к разрушению композита, развивается в результате слияния нескольких макротрещин в сопряженных полосах локализованной деформации.

Кривая напряжение–деформация твердого сплава, полученная путем измерения остаточной деформации после разгрузки образца, имеет обычный вид. До уровня напряжений $\sigma = 2500$ МПа на кривой наблюдается область линейного увеличения, а затем от 2500 МПа и до разрушения наблюдается параболическая зависимость роста деформации от напряжения. В логарифмических осях на кривой $\sigma - \varepsilon$ было выявлено три прямолинейных участка, соответствующих трем стадиям деформационного упрочнения композиционного материала, в которых происходят кардинальные изменения в структуре композита и которые, возможно, отражают смену механизмов деформации твердого сплава. На первом участке с показателем степени деформационного упрочнения $n = 0.54$ происходит совместная деформация матрицы и карбидной фазы без видимых признаков разрушения композита. Второй участок ($n = 0.31$), после начала макротекучести, соответствует переходной области. И наконец, на третьем участке, при $n = 0.15$, наряду с деформацией структурных составляющих развиваются процессы, ведущие к разрушению твердого сплава (образование и развитие полос локализованной деформации, микро- и макротрещин).

По данным рентгеноструктурного анализа измерили размер областей когерентного рассеяния (CDD) и микроискажения кристаллической решетки ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$) в матрице и карбидной фазе. В исходном состоянии в γ -фазе формируется мелкокристаллическая структура с размером блоков $\approx 60 \pm 5$ нм. До напряжений, равных 600 МПа, CDD не изменяется. При увеличении приложенных напряжений ($\sigma = 700 - 1700$ МПа) CDD в аустените возрастает с 60 до 67 нм. Такое увеличение размеров блоков в аустенитной матрице на начальном этапе нагружения твердого сплава возможно связано в соответствии с [8] с уменьшением плотности дислокаций за счет их аннигиляции и выхода на границы зерен. Увеличение напряжений свыше 2000 МПа приводит к уменьшению CDD до 30 нм и увеличению ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$).

Размер областей когерентного рассеяния в карбиде вольфрама в исходном состоянии составляет 400 ± 50 нм. До уровня приложенных напряжений ≈ 2500 МПа CDD и $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$ в карбиде вольфрама практически не изменяются, а при дальнейшем увеличении напряжений CDD уменьшается до 100 нм.

Определение величины микродеформаций кристаллической решетки фаз, входящих в состав композита, показало, что, хотя их величины для карбида вольфрама и аустенитной матрицы отличаются, величины микронапряжений равны на всех этапах нагружения композиционного материала (рис. 3). Это свидетельствует об отсутствии скачка напряжений на границе раздела карбид–связка и означает, что происходит совместная пластическая деформация связующей фазы и упрочнителя, а наблюдаемые трещины на границе раздела фаз обусловлены ограниченной пластической деформацией карбида вольфрама.

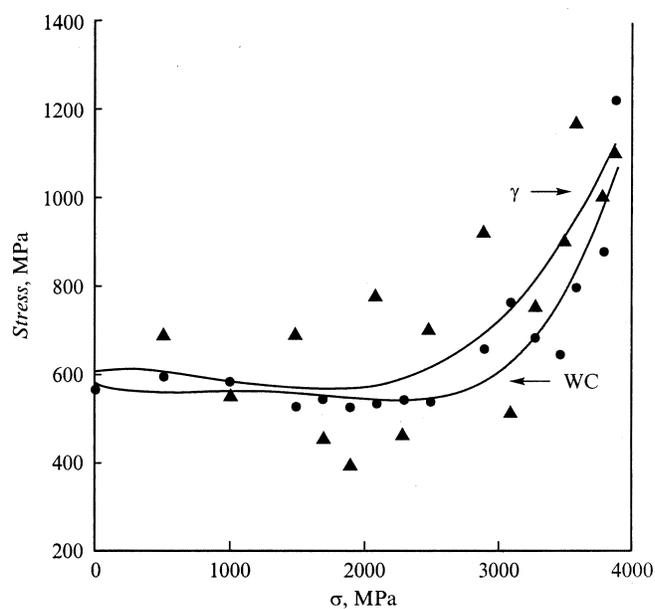


Рис. 3. Зависимости микронапряжений, формирующихся в связующей фазе и карбиде вольфрама при увеличении внешнего напряжения.

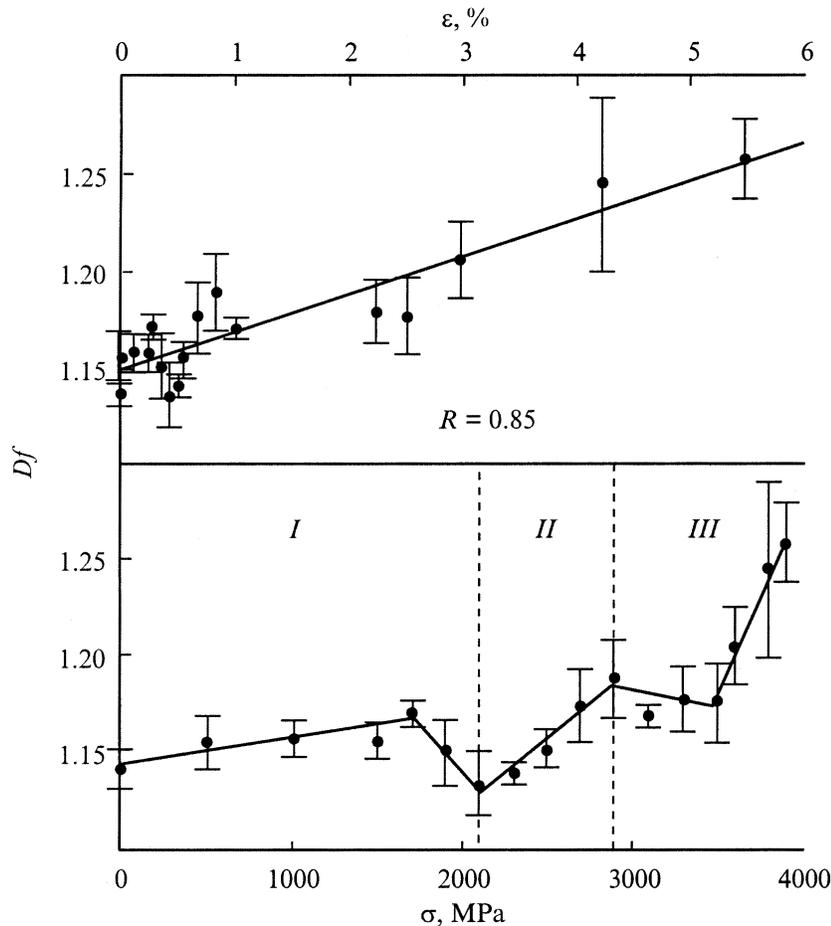


Рис. 4. Изменение фрактальной размерности участка поверхности твердого сплава WC–сталь 80Г4 в зависимости от напряжения и уровня остаточной деформации.

На рис. 4 представлено изменение фрактальной размерности профиля деформируемой поверхности твердого сплава в процессе ступенчатого нагружения образца в зависимости от остаточной деформации и приложенного напряжения. Видно, что по мере увеличения деформации значения Df меняются по линейному закону, в то время как с ростом напряжения фрактальная размерность меняется немонотонно. Участки повышения сменяются участками с понижением Df .

Выделенные на σ – ε три области напряжений, в которых происходят кардинальные изменения в структуре композита при деформации были сопоставлены со значениями фрактальной размерности. На рис. 4 эти области показаны вертикальными линиями. В первой области фрактальная размерность сначала увеличивается, а затем уменьшается до исходного значения. Незначительное изменение Df может быть связано с появлением деформированных участков связки и полос скольжения на крупных карбидных зернах, а также с увеличением областей когерентного рассеяния в аустенитной матрице. На увеличение фрактальной размерности на втором участке может оказывать влияние нескольких факторов. С одной

стороны, на данном этапе происходит интенсивная деформация карбидных зерен и связующей фазы, при этом в процессе пластического течения вовлекаются зерна меньшего размера. Наблюдается увеличение количества трещин по границе раздела карбид–связка. Анализ параметров внутренней структуры композита показал, что на данном этапе нагружения происходит незначительное уменьшение размеров блоков в матрице и карбидной фазе. На третьем участке значения фрактальной размерности сначала не изменяются, а затем после достижения уровня приложенных напряжений 3500 МПа резко увеличиваются. Анализ структурных изменений, происходящих в композите на последних этапах деформации, показывает, что процессы пластической деформации конкурируют с процессами разрушения композита. С одной стороны, происходит накопление множественных повреждений в виде микро- и макротрещин, разрушение карбидных зерен, локализация деформации в нескольких сопряженных полосах локализованной деформации. С другой стороны, наблюдаются резкое уменьшение размеров областей когерентного рассеяния и увеличение микроискажений кристаллической решетки в матрице

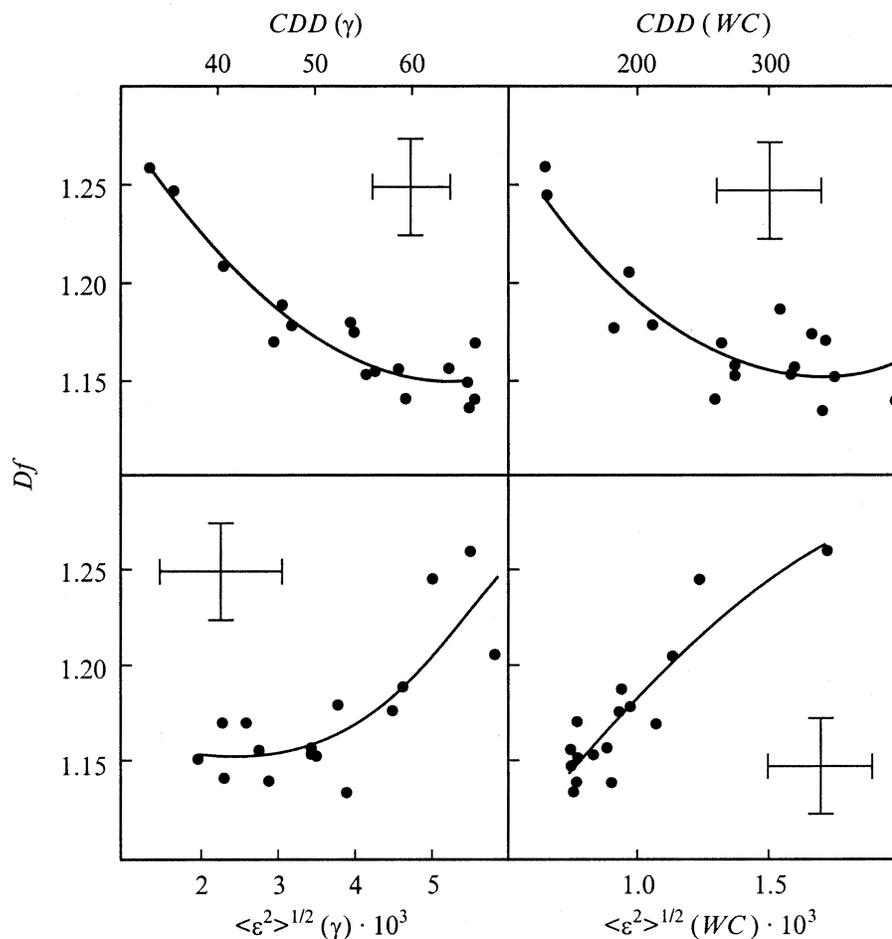


Рис. 5. Связь параметров рельефа с параметрами внутренней структуры твердых сплавов.

и карбидной фазе, что свидетельствует об интенсивной пластической деформации структурных составляющих твердого сплава.

На рис. 2 (кривая 2) показано изменение фрактальной размерности в зависимости от среднего расстояния между полосами локализованной деформации. Видно, что уменьшение среднего расстояния между полосами приводит к заметному росту фрактальной размерности. Значение Df мало там, где расстояние между полосами максимально, т.е. чем сильнее фрагментирована поверхность твердого сплава, тем выше значение фрактальной размерности.

На рис. 5 представлены зависимости между фрактальной размерностью и параметрами тонкой кристаллической структуры связки и карбидной фазы. Видно, что с уменьшением размеров областей когерентного рассеяния в аустенитной матрице и карбиде вольфрама фрактальная размерность возрастает. В то же время увеличение микроскажений кристаллической решетки обеих фаз также приводит к росту Df , т.е. изменение фрактальной размерности отражает изменения, происходящие в микроструктурных параметрах.

Выводы

1. Изменение фрактальной размерности обусловлено появлением на деформируемой поверхности композита структурных особенностей в виде полос скольжения на карбидных зернах, рельефа на связке, микро- и макротрещин, полос локализованной деформации.

2. Показано, что фрактальная размерность линейно увеличивается с ростом остаточной деформации, в то же время в зависимости от напряжения фрактальная размерность меняется немонотонно. Выявлено три интервала изменения Df , соответствующих характеру деформирования композита.

3. Образование деформационного рельефа на поверхности твердого сплава определяется изменениями, проходящими в материале на микроструктурном уровне. Показано, что с уменьшением размеров областей когерентного рассеяния и с увеличением микроскажений кристаллической решетки в аустенитной матрице и карбиде вольфрама фрактальная размерность возрастает.

Список литературы

- [1] *Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
- [2] *Королев П.В., Кульков С.Н.* // Перспективные материалы. 1997. № 3. С. 21–27.
- [3] *Панин В.Е., Кузнецов П.В., Дерюгин Е.Е., Панин С.В., Елсукова Т.Ф.* // ФММ. 1997. Т. 84. Вып. 2. С. 118–122.
- [4] *Севостьянова И.Н., Кульков С.Н.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 2. С. 34–38.
- [5] *Севостьянова И.Н., Гюсов С.Ф., Гармс А.П., Кульков С.Н.* // Перспективные материалы. 1998. № 4. С. 37–41.
- [6] *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. 375 с.
- [7] *Вишняков Я.Д.* Современные методы исследования структуры деформированных кристаллов. М.: Металлургия, 1975. 480 с.
- [8] *Хирт Д., Лоте И.* Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 600 с.