

Таким образом, данный опыт демонстрирует эффективность применения такой геометрии для акустических методик индикации параметров импульсных пучков ускоренных частиц.

Работа выполнена при поддержке фонда Мин. образования РФ 1997 г. (грант 97-0-7.2-156).

#### Библиографический список

1. В. Д. Воловик, В. Т. Лазурик-Эльцуфин. ФТТ, 2305, 1973. – Т. 15
2. С. В. Блажевич, И. А. Гришаев, В. В. Петренко, Г. Л. Фурсов. ФТТ, 3636, 1975. – Т. 17.
3. В. В. Ганн, А. И. Жуков, С. В. Блажевич. ВАНТ, серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1983, 4 (27), 75-78

---

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДО И ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ

---

УДК 539.4

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЙ НА МАКРО- И МЕЗОУРОВНЕ

В. В. Осташев, О. Д. Шевченко

*Исковский политехнический институт*

**1. Постановка задачи.** Проблема конструкционной прочности материалов остается одной из центральных и общей на всех этапах развития физики и механики прочности, инженерного материаловедения и технологии обработки. Однако различие в методологии исследований, различное понимание кинетики деформации и разрушения, неадекватность их математического и физического описания концепциями различных уровней часто приводит к противоречивым и ошибочным представлениям.

Понятие конструкционной прочности предполагает ряд количественных характеристик, описывающих работу материала в конструкции и определяемых как внутреннюю реакцию материала на условия нагружения. Решение проблемы адекватности механических свойств материала и изделия встречает серьезные трудности при рассмотрении ее как в терминах механики сплошной среды, так и с позиции теории дислокаций [1].

В этой связи является перспективным проведение исследований на мезоуровне, основанных на синергетических представлениях о прочности и пластичности, с разработкой новых расчетно-экспериментальных методик и использованием компьютерного моделирования [2,3].

В основе моделей физической мезомеханики лежит описание эволюции крупномасштабных дефектов, называемых мезодефектами. При этом ключевыми, наиболее обсуждаемыми и дискуссионными, являются понятия: геометрический образ деформационного дефекта, диссипативные структуры, представительский объем, а само явление конструкционной прочности отражается как мера устойчивости и самоорганизации диссипативных структур. Такой подход позволяет полагать, что формирование структуры материала, связанной с развитием процессов пластической деформации и разрушения на стадии эксплуатации изделия, – лишь продолжающаяся тенденция, основа

которой заложена на стадии технологической обработки.

Основная задача представленной работы заключается в том, чтобы показать ведущую роль мезоуровня в структурообразовании конструкционных материалов. При этом эволюция диссипативных структур, рассматриваемая в неразрывном единстве на стадии технологического и эксплуатационного воздействия, является формой управления и организации механических свойств.

**2. Методика исследования.** Методом математического планирования, постановкой факторного эксперимента  $2^4$ , исследовано влияние условий нагружения на характеристики прочности и пластичности двух сталей, каждая из которых находилась в двух состояниях за счет соответствующей технологической обработки.

1. Сталь типа 18-8 открытого переплава и после двойного вакуумного переплава (ВИ+ВД).

2. Сталь 35XCH2MA после стандартной упрочняющей обработки и упрочняющей ТЦО.

Информацию для оценки конструкционной прочности по параметрам деформации на мезоуровне получали в виде периодограмм, фазовых и бифуркационных диаграмм путем аналитической обработки полей смещения узлов делительной сетки, нанесенной непосредственно на деформируемый образец. Геометрическим образом деформационного дефекта на верхнем структурном уровне является ячейка делительной сетки размером 10 мкм. Любой более грубый структурный уровень характеризуется набором первичных ячеек. Исследовались делительные сетки на длине 6-12 мм. Составляющие тензора деформаций и поворот рассчитывались по формулам Коши.

Условия проведения факторного эксперимента для стали 18-8 приведены в табл. 1.

На основе такого представления резонансно-поисковым методом рассчитаны периодограммы для линейных, сдвиговых и поворотных мод для четырех дискретных деформаций в условиях факторного эксперимента [2]. Каждая периодограмма характеризует количество гармонических составляющих определенной длины волны и амплитуды в спектре соответствующей деформации. Изменение параметров периодограмм указывает на проявление материалом существенно нелинейных свойств, отражает кинетику диссипативных структур в виде явлений – синхронизация, стохастичность, самоорганизация, указывает на количественную связь диссипативных структур и механических свойств материала. Фазовая диаграмма строится в координатах «оператор М – оператор N», бифуркационная диаграмма – в координатах микропластическая деформация – период. Методом скользящего частотного «окна» уславливаются все присутствующие на фазовой диаграмме бифуркации и границы, разделяющие области притяжения различных аттракторов [3].

**3. Конструкционная прочность на макроуровне.** После реализации плана  $2^4$  получены линейные модели для сталей 18-8 и 35XCH2MA в двух сравниваемых по конструкционной прочности состояниях. Модели отражают влияние каждого из факторов в заданном факторном пространстве на соответствующую функцию отклика (табл.2). Знак и величина коэффициентов регрессии оценивает вклад, вносимый в значение функции отклика статистически значимых факторов.

Таблица 1

Факторы	Скорость деформации, 1/сек $10^{-3}$	Рабочая длина образца, мм	Размер зерна, мм	Податливость системы, мм/кг
Код	X1	X2	X3	X4
Основной уровень	3	60	200	0,03
Интервал	2	40	150	0,02
Верхний уровень	5	100	350	0,05
Нижний уровень	1	20	50	0,01

Марка стали	Уравнение модели для функций отклика ( $\sigma_b$ , $\sigma_{0,2}$ , $\delta$ )
12X18P10T	$\sigma_b = 556 + 43,3X_1 - 13,6X_2 - 7,6X_3 - 11,6X_4$ $\sigma_{0,2} = 220 + 32,6X_1 - 18,6X_2 - 12,8X_3 - 20,1X_4$ $\delta = 40,8 - 0,95X_1 - 6,8X_2 + 5,6X_3 - 1,8X_4$
01X18N14 ВИ+ВД	$\sigma_b = 508 - 6,7X_1 - 4,7X_2 - 6,3X_3 - 2,1X_4$ $\sigma_{0,2} = 190 + 0,8X_1 - 4,6X_2 - 4,1X_3 - 4,6X_4$ $\delta = 51 - 0,25X_1 - 6,7X_2 + 3,5X_3$
35XCH2MA 3 910°C+ 0 250°C	$\sigma_b = 1680 + 66X_1 - 54X_2 - 127X_4$ $\sigma_{0,2} = 1440 - 37X_2 + 19X_4$ $\delta = 10 + 7,1X_1 - 6,9X_2 - 1,2X_4$
35XCH2MA ТЦО	$\sigma_b = 1880 + 11X_1 - 23X_2 - 17X_4$ $\sigma_{0,2} = 1710 + 8X_1 - 10X_2$ $\delta = 11 + 2,4X_1 - 1,3X_2 - 1,1X_4$

Существенным отличием моделей является статистическая незначимость всех коэффициентов для стали 01X18N14 ВИ+ВД и стали 35XCH2MA после ТЦО. Это показывает, что градиент функции отклика в исследованном факторном пространстве меньше соответствующего значения дисперсии эксперимента. И практически означает, что стали в этом состоянии не являются чувствительными, например, к масштабному фактору, динамическим перегрузкам, перегреву и т.д. и вне зависимости от механических характеристик, полученных на стандартных образцах, по конструкционной прочности превосходят их аналоги.

Отсюда следует, что критерием выбора и оценки материала по конструкционной прочности, по крайней мере, для материалов одного класса должно быть не столько абсолютное значение характеристик, сколько инвариантность их к условиям нагружения.

**4. Дефекты мезоуровня и принципы структуризации.** В данной работе критерием принадлежности деформационного дефекта к определенному структурному уровню является принцип неразличимости состояния, введенный Лейбницем (принцип идентификации неразличимости).

В приложении к рассматриваемой проблеме он формулируется так: деформационные дефекты, определяющие один структурный уровень, в своем развитии и взаимодействии должны обладать настолько похожими свойствами, чтобы быть неразличимыми

ми при аналитической обработке по данной методике.

Целесообразную деятельность всей сложной системы взаимодействующих деформационных дефектов на каждом структурном уровне обеспечивает принцип синхронизации. Под синхронизацией понимаем наиболее общий случай установления определенных частотных соотношений между отдельными деформационными дефектами и группами дефектов.

Количественной мерой синхронизации является коэффициент синхронизации (КС) [3]. КС рассчитывался по периодограммам линейных микропластических деформаций для набора деформационных дефектов, отождествляемых с размерами ячейки делительной сетки от 10 до 120 мкм.

По закономерностям изменения КС деформационные дефекты можно разбить на три группы и задать иерархию структурных уровней: 1) уровень внутриверенных пластических деформаций – размер дефекта 10,20 мкм; 2) уровень межзеренных пластических деформаций – размер дефекта – 40,60 мкм; 3) уровень взаимодействия групп зерен, как целого – 80,120 мкм (рис.1).

Структуризация по КС показывает пространственно-временный характер развития процессов пластической деформации. Различие в абсолютных значениях КС указывает на преобладание динамических или стохастических процессов на каждом структурном уровне – динамический режим характеризуется ростом КС. Физически это можно

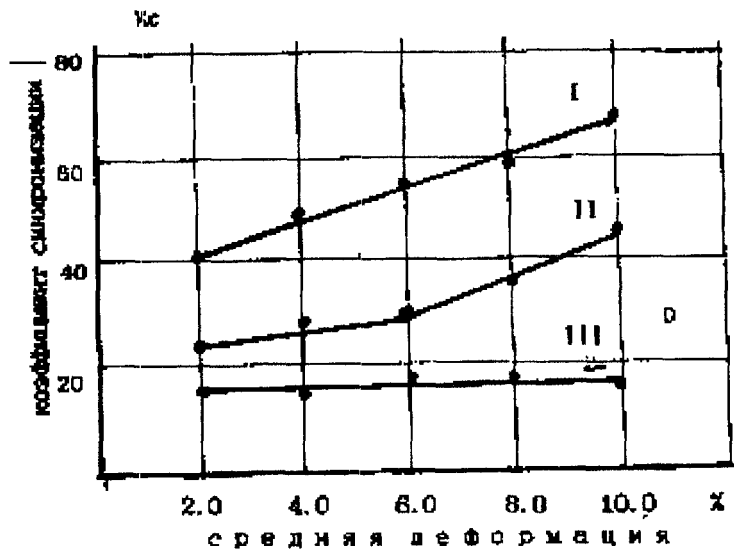


Рис. 1. Графическое определение структурных уровней по изменению коэффициента синхронизации.

- I — размер дефекта 10-20 мкм.
- II — 40-60 мкм.
- III — 80-120 мкм.

представить как объединение синхронно работающих деформационных дефектов в синхронные кластеры, последовательно переходящих в фрактальные, и чем больше гармоник задействовано в работе такого кластера на каждом структурном уровне, тем выше пластичность материала.

**5. Самоорганизация и устойчивость диссипативных структур.** Мету стохастичности, самоорганизацию и устойчивость диссипативных структур оценивали с помощью фазовых диаграмм для линейных, сдвиговых и поворотных мод деформаций (рис. 2).

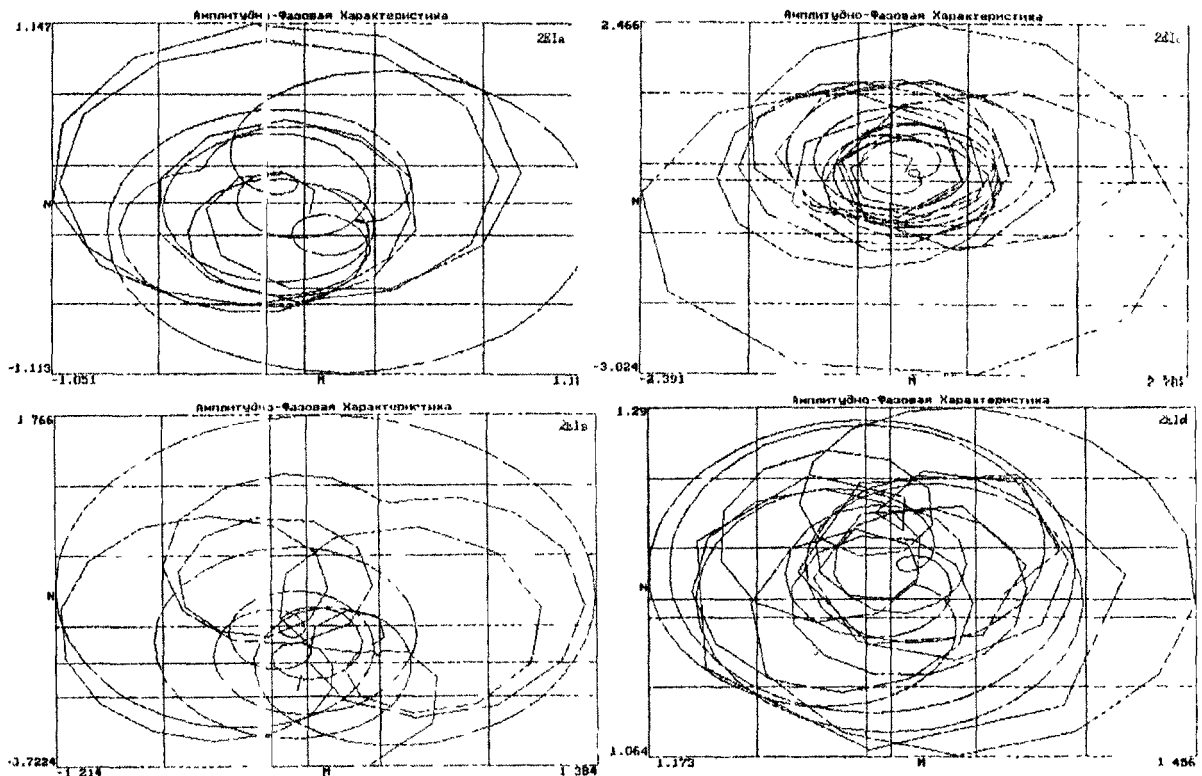


Рис. 2. Вид фазовых диаграмм для сдвиговой (а, в) и поворотной (б, г) мод деформации для стали 18-8 в условиях максимальной пластичности: а, в — общая деформация 2%; б, г — 4%.

Устойчивость диссипативных структур для условий максимальной пластичности поддерживается за счет строгого динамического процесса «сдвиг – поворот – сдвиг», так что в любой момент времени по одной из мод деформации (сдвиговой или поворотной) на фазовой диаграмме сохраняется устойчивый предельный цикл.

По подобию топологической структуры фазовых диаграмм на разных уровнях можно судить о выполнении принципа масштабной инвариантности, что указывает на большую устойчивость диссипативных структур. Это необходимый признак повышения конструкционной прочности.

Совместный анализ фазовых диаграмм для линейных, поворотных и сдвиговых мод деформаций показывает, что диссипативные структуры развиваются в определенной последовательности, проявляются сочетанием бифуркаций различной коразмерности в виде регулярных и хаотических аттракторов.

Таким образом, деформируемый поликристаллический материал может быть представлен как грубая система, т.е. топологическая структура фазовой диаграммы устойчива в некотором диапазоне изменения деформации, при достижении критического значения происходит бифуркация по одной из мод деформации (сдвиговой или поворотной).

Методика позволяет выделить границы в фазовом пространстве, разделяющие области притяжения различных аттракторов [4]. Под аттрактором понимаем геометрическую структуру, отражающую устойчивое поведение деформируемого материала в фазовом пространстве. На приведенных фазовых диаграммах можно выделить регулярные аттракторы типа предельный цикл, релаксационный цикл, неустойчивый фокус. Связь между регулярными аттракторами осуществляется через хаотические аттракторы.

Хаос всегда выступает как механизм перехода от одной относительно устойчивой структуры к другой. Наличие нескольких аттракторов принципиально связано с возможностью управления механическими свойствами в материалах. Как для любой открытой нелинейной системы малое изме-

нение начальных данных вблизи границы приводит к качественно различному поведению материала, особенно в области развитой пластической деформации, и отображается на макроскопических характеристиках.

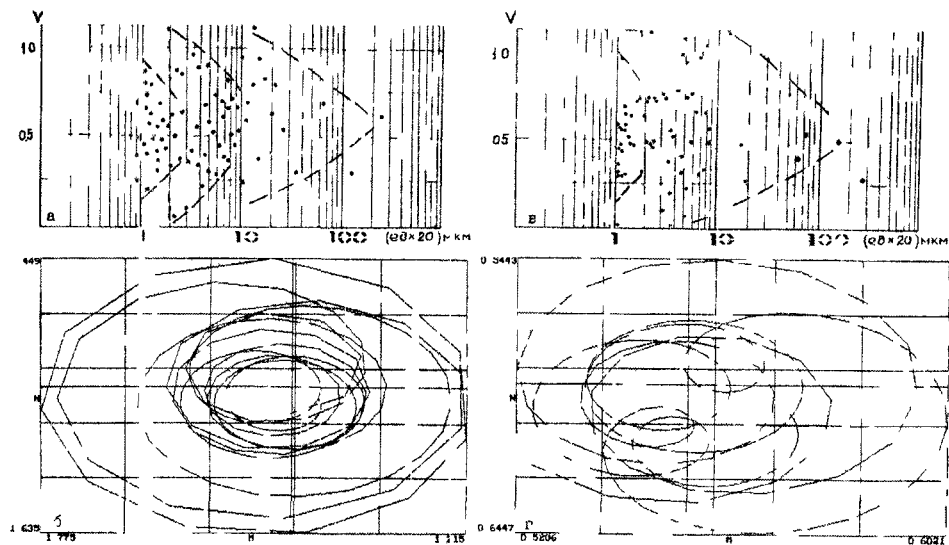
## **6. Моделирование конструкционной прочности по параграмм деформации.**

При формировании структуры и механических свойств стали 35ХСН2МА после сравниваемых упрочняющих обработок исследовано четыре уровня влияния [5]:

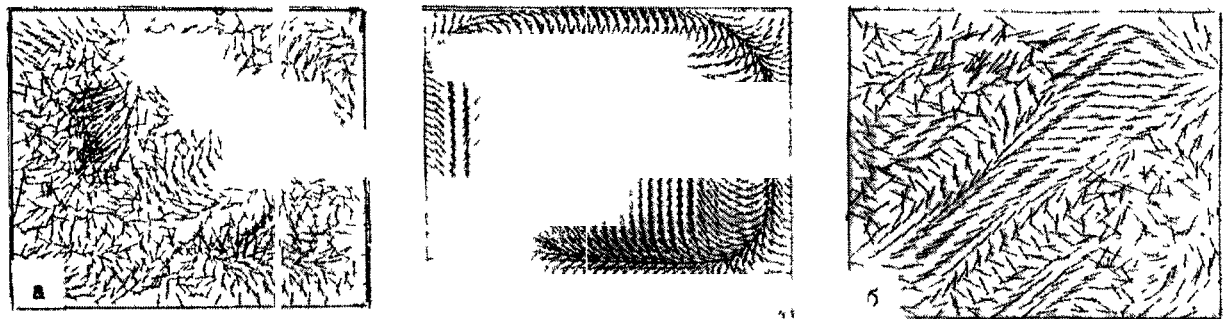
- микроструктурный, учитывающий концентрационные и структурные микронеровности, растворение и выделение избыточных фаз, диффузионные процессы;
- субструктурный, связанный с развитием субграниц, препятствующих транскристаллитному перемещению дислокаций;
- структурный, связанный с движением большеугловых границ и изменением их конфигурации;
- мезоуровень, определяющий развитие трансляционных и ротационных мод деформации.

Основное отличие между состояниями стали 35ХСН2МА после различных термических обработок выявлено на мезоуровне, это дает основание полагать, что в зависимости от вида субструктуры или структуры вообще, полученной при термической обработке исследуемой стали, можно поставить в соответствие определенную стадию деформационного упрочнения, т. е. в процессе термической обработки в исследуемую сталь закладывается различная потенциальная мера развития диссипативных процессов. При этом для стали в состоянии ТЦО и стандартной термической обработки можно указать общие закономерности и отличительные черты (рис.3).

1. Существенную разницу в состояниях определяет оценка представительского объема  $d$  по бифуркационным диаграммам. При всех условиях нагружения в стали после ТЦО максимальное значение  $d = 4,35$  мм, что существенно меньше минимального значения 5,12 после стандартной термической обработки. Представительский объем – кон-



Р и с 3 Бифуркационные (а, в) и фазовые диаграммы (б, г) для стали 35XCH2MA после ТЦО (а, б) и контрольной термической обработки (в, г)



Р и с 4 Вид полей деформации для стали 35XCH2MA  $\varepsilon = 2,5\%$ ;  
а – сталь после ТЦО, б, в – стандартная термическая обработка .

цептуальное понятие характеризующее границу применения ме омеханики, говорит об однородности развития микропластических деформаций

2 Фазовые диаграммы отличаются по топологической структуре. кинетика пластической деформации для термоциклированной стали определяется набором регулярных аттракторов, для стандартной термической обработки характерно преобладание хаотических аттракторов по линейной моде деформации

3 Устойчивость регулярных аттракторов по сдвиговым и поворотным модам микропластических деформаций для стали после ТЦО выше по всем структурным уровням.

4 Для термоциклированной стали вне зависимости от условий нагружения поле деформаций характеризуется набором

микровихрей, их движением и взаимодействием (рис.4). Вид поля деформации после стандартной обработки изменяется в широком диапазоне от комбинации микровихрей с полосой сдвига до спиральной волны.

## 7. Выводы.

1. Задача проектирования материала и технология его обработки должны рассматриваться в неразрывном единстве так, чтобы конечная структура материала и ее последующая эволюция под действием внешних факторов отвечала бы критериям прочности и пластичности мезомеханики

2. Критерием выбора материала и оценки его по конструкционной прочности должны служить не абсолютное значение механических свойств или их сочетания, полученные на стандартных образцах, а инвариантность их к условиям нагружения.

### Библиографический список

1. Панин В. Е. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1, II.
2. Осташев В. В., Самаркин А. И., Шевченко О. Д. Резонансно-поисковый метод анализа процесса развития пластических деформаций в поликристаллах // Научные ведомости БГПУ, 1996. – С.72-76.
3. Осташев В.В., Шевченко О.Д. Динамические особенности пластической деформации поликристаллов // Письма в ЖТФ, 1998. – Т.25. – Вып. 16. – С.50.
4. Шевченко О.Д., Осташев В.В., Федюкин В.К. Виды бифуркаций и аттракторов при пластической деформации поликристаллов: Труды ППИ, 1998. – № 2. – С.142-147.
5. Осташев В.В., Шевченко О.Д. Физические основы управления свойствами конструкционных сталей: Труды ППИ, 1997. – № 1. – С. 118-123.

УДК 539 374

## К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ РАЗВИТИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ В ОБЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Н. В. Камышанченко, В. В. Красильников, В. В. Сирота, Н.А. Чеканов

*Белгородский государственный университет*

И.М. Неклюдов, А.А. Пархоменко

*НИЦ Харьковский физико-технический институт*

В последнее время широкое распространение получил синергетический подход к описанию эволюции пластической деформации в материалах (см., например, Г. А. Малыгин, ФТТ, т. 37, в.1, с.3-42). В основе такого подхода лежат кинетические уравнения для локальной плотности дислокации  $\rho(\vec{x}, t)$  ( $x$  – пространственная координата,  $t$  – время), учитывающие различные процессы взаимодействия движущихся дислокаций друг с другом и другими дефектами кристалла. Существенную роль при этом играет то обстоятельство, что данная физическая модель адекватно описывает процессы различных взаимодействий, происходящих в кристаллах под воздействием как внутренних, так и внешних напряжений. Существует несколько теоретических подходов к изучению процессов, происходящих при коллективном поведении дислокаций. При этом, как правило, в используемых эволюционных уравнениях для плотности дислокаций  $\rho(\vec{x}, t)$  нелинейность процессов пластичности представлена членами, квадратичными по плотности дислокаций  $\rho^2$  (см., например, Г. Ф. Сарафанов, ФММ, т. 85,

в. 3, с. 45-53, (1998); Ш. Х. Ханнанов, ФММ, т. 85, в. 5, с. 11-20, (1998)).

В настоящей работе представлена модель, описывающая в синергетическом подходе формирование дислокационных структур в облученных деформированных материалах под влиянием нелинейных эффектов, связанных с наличием неоднородного распределения дислокаций. Используются эволюционные уравнения, описывающие коллективное поведение дислокаций, учитывающие так называемую нелинейность Бюрджера, то есть члены типа  $\rho(\partial\rho/\partial x)$ . Сходные идеи использовались для анализа эволюции дислокационных структур на основе нелинейного уравнения Бюрджера в работе Г. Ф. Сарафанова, С. Н. Нагорных «Физика прочности и пластичности материалов». (Тезисы докладов XIV Междунар. конф., Самара, 1995 г., с.59-60). В основе нашей модели лежит гидродинамическое описание системы движущихся дислокаций с помощью локальной плотности дислокаций  $\rho(\vec{x}, t)$  и плотности потока  $\vec{j}(\vec{x}, t)$  дислокаций как потока «квазичастиц», подчиняющихся уравнению баланса: