

УДК 539.4.015: 548.4: 621.77

*Ф.З. УТЯШЕВ\**, *Р.Ю. СУХОРИКОВ\*\**, *А.А. НАЗАРОВ\**, *А.И. ПОТЕКАЕВ\*\*\**

## РОЛЬ И ВЕЛИЧИНА КОМПОНЕНТОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ И НАНОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ В МАТЕРИАЛАХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ<sup>1</sup>

На примере равноканального углового прессования рассмотрено влияние кинематики течения металла при интенсивной пластической деформации металлов на величину деформации и особенности структурных изменений. Показана роль сдвиговой и поворотной деформаций в формировании ультрамелкозернистых структур и определен вклад этих составляющих в общую деформацию.

**Ключевые слова:** *интенсивная пластическая деформация, немонотонная деформация, траектория деформации, составляющие деформации, дисторсия, микрополосы.*

### Введение

Для создания ультрамелкозернистой (УМЗ) и наноразмерной микроструктуры в объемных образцах материалов широко используются методы, основанные на приложении к образцам больших пластических деформаций. Эти методы объединяются ставшим общепотребительным названием «интенсивная пластическая деформация» (ИПД) [1–3], хотя рядом авторов предлагается использовать другие термины, как, например, мегапластическая деформация [4], деформационные методы наноструктурирования [5] и др. Каждое из этих названий подчеркивает одну из характерных особенностей методов ИПД – интенсификацию деления зерен за счет сложного, немонотонного характера деформации или большие степени деформации, необходимые для достижения УМЗ-структуры с большеугловыми разориентировками.

В этой связи возникает вопрос о величине деформации, необходимой для формирования УМЗ- и наноразмерной структуры, и её компонентах, поскольку существует много мер и компонентов деформации. В механике сплошных сред большой величиной деформации считают деформацию свыше  $e \sim 1$ , в результате которой материал приобретает качественно иные свойства [6]. В металлофизике такую деформацию связывают с действием ротационных мод, которое начинается при величине  $e = 0.2–0.3$ , продолжается до деформации в несколько единиц и приводит к фрагментации с образованием большеугловых границ деформационного происхождения и, как следствие, к значительному упрочнению материалов [7].

Эффективность деформационного измельчения зерен методами ИПД обусловлена их кинематическими особенностями, влияющими на необходимые для наноструктурирования металлов величину и моды деформации. Работ, посвященных изучению влияния механики обработки металлов давлением (ОМД) на происходящие в них структурные изменения, мало [8–10]. Недостаточное освещение связи между деформированным и структурным состояниями металла является причиной недооценки роли различных составляющих деформации в методах ИПД.

В данной работе на примере распространенного метода ИПД – равноканального углового прессования (РКУП) – проанализирована роль сдвиговой и поворотной составляющих деформации в структурообразовании и выполнена оценка их вклада в степень деформации образца. Предложен подход к определению накопленной деформации на базе подхода Лагранжа к описанию кинематики течения сплошной среды.

### Кинематика и деформированное состояние

В механике сплошной среды [6] скорость движения произвольной материальной точки, положение которой задается радиусом-вектором  $R$ , можно определить как

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор проекта прикладных научных исследований – RFMEFI60414X0091).