

**Трехуровневая модель для описания сверхпластического деформирования алюминиевого сплава**  
 Э.Р. Шарифуллина, П.В. Трусов, А.И. Швейкин  
 elvira16\_90@mail.ru, www.mmsp.pstu.ru

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра «Математическое моделирование систем и процессов» (Пермь, Россия)

**АКТУАЛЬНОСТЬ**

Использование технологий на основе сверхпластического (СП) деформирования является весьма перспективным. Одним из его очевидных преимуществ является возможность получения крупногабаритных деталей наиболее эффективной геометрической формы с уменьшенным количеством сварных швов при значительном снижении нагрузок на обрабатывающие инструменты [1,2,3,4]. Это позволяет существенно снизить стоимость изготовления изделий.

**Зависимости напряжений от деформаций** для многих материалов (в том числе – широко применяемых в промышленности), полученные в экспериментах по СП деформированию, реализуемых обычно одноосным растяжением, **демонстрируют стадийность\*** (обзор приведен в [5]) – в общем случае, это стадии упрочнения (сразу после участка упругости), стабильного течения и разупрочнения. Подобная ситуация характерна и для технологий на основе СП.

\*Это связано с реализацией различных механизмов, их взаимодействием и сменой их ролей в процессе деформирования.

Создание математических моделей материалов с физически обоснованным описанием указанных особенностей весьма актуально.

[1] Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.  
 [2] Фридляндер И.Н. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – №7. – 19 с.  
 [3] Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А., Имаев М.Ф., Имаев В.М. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технологии. – М.: Наука, 2014. – 284 с.  
 [4] Шоршоров М.Х., Базык А.С., Казаков М.В. Сверхпластичность сталей и сплавов и ресурсосберегающие технологии процессов обработки металлов давлением. – Тула: Изд. ТГУ, 2018. – 158 с.  
 [5] Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И., Трусов П.В. // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2018. - С.103-127.

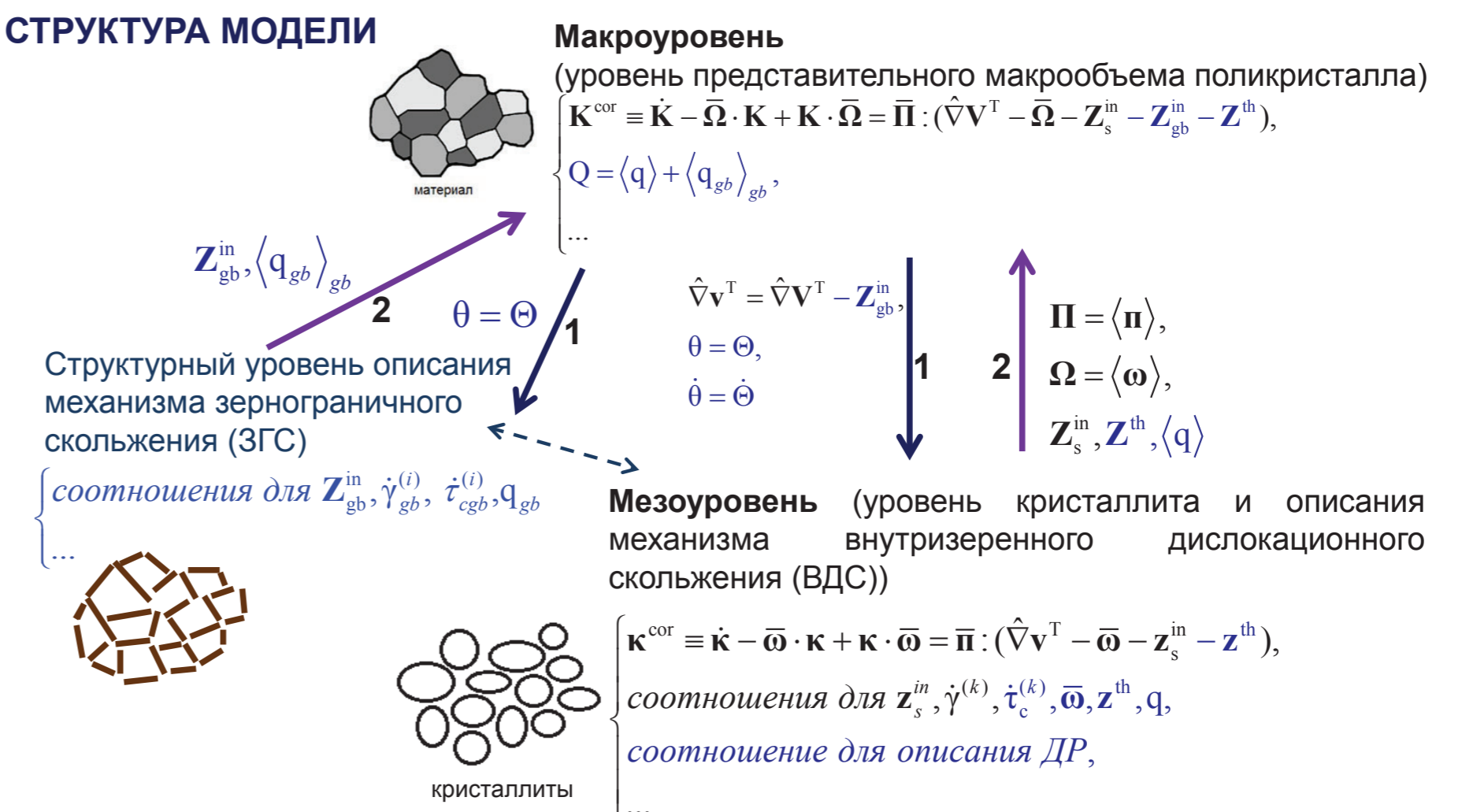
**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

В исследованиях по структурной СП металлов и сплавов показано [5], что преобладающую роль играет механизм **зернограничного скольжения** (ЗГС), при этом, как правило, отмечается важность его взаимодействия с **внутризерненным дислокационным скольжением** (ВДС) и **зернограничной диффузией**. Кроме того, при температурно-скоростных условиях, характерных для СП, реализуется **динамическая рекристаллизация**. При моделировании СП деформирования и переходных к нему режимов важным является учет всех перечисленных механизмов и процессов и их физически обоснованное описание. Для этого перспективным представляется **многоуровневый физический подход к формулировке конститутивных моделей материалов** [6].

Целью работы является построение модифицированной статистической многоуровневой модели на базе физической теории упруговязкопластичности, позволяющей с достаточной степенью адекватности описывать ключевые физические процессы, наблюдаемые при деформировании с переходом к режиму структурной СП, с учетом эволюционирующей структуры материала [7,8].

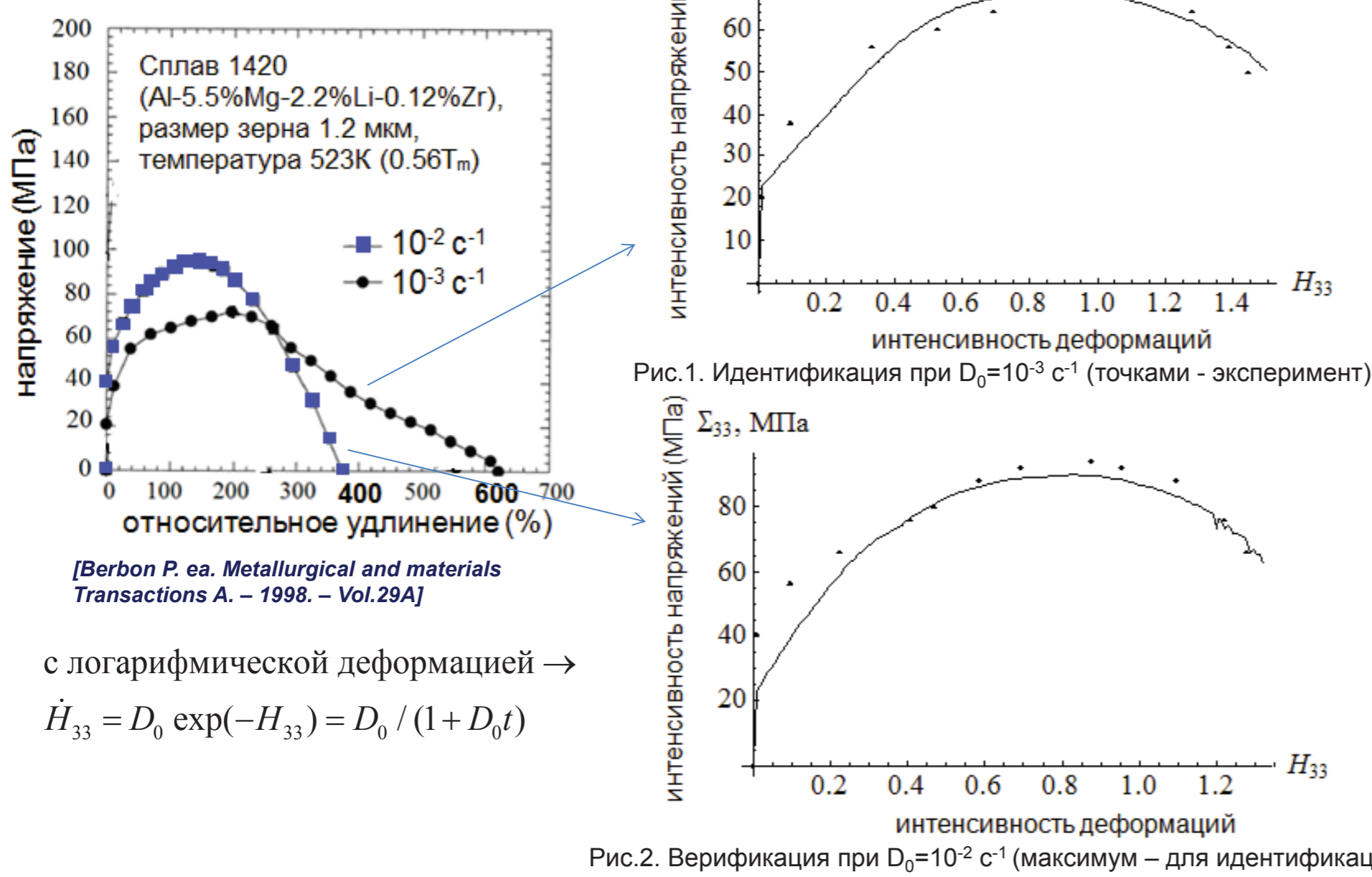
[6] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2019. – 605 с.  
 [7] Трусов П.В., Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И. // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т.22, №2. – С.5-23.  
 [8] Shveykin A.I., Trusov P.V., Sharifullina E.R. // Crystals. – 2020. – Vol. 10, Is. 9. – 18 p.

**СТРУКТУРА МОДЕЛИ**



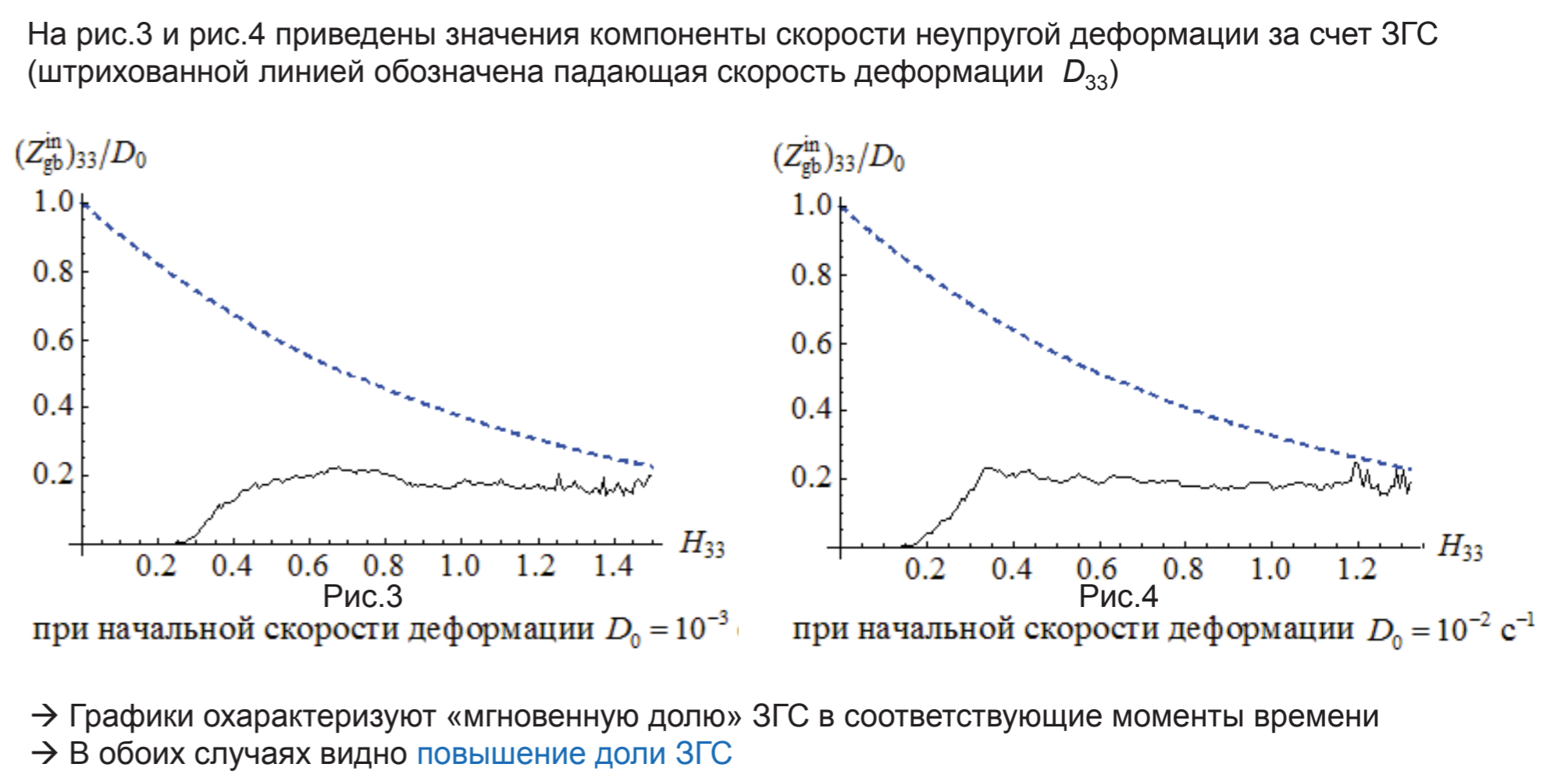
В модель включены следующие **основные механизмы и процессы**: ВДС, повороты решеток кристаллитов, изменение зеренной структуры; особое внимание посвящено **описанию ЗГС**, лидирующего при структурной СП, и сопровождающих его аккомодационных механизмов – зернограничной диффузии и динамической рекристаллизации (ДР).  
 Модель учитывает **взаимодействие механизмов ЗГС и ВДС**, а также **изменение их ролей** при деформировании, что отражено в соответствующих законах упрочнения.

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ. ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ. ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ**



с логарифмической деформацией →  
 $\dot{H}_{33} = D_0 \exp(-H_{33}) = D_0 / (1 + D_0 t)$

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ. ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ. ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ**



**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ. ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ. ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ**

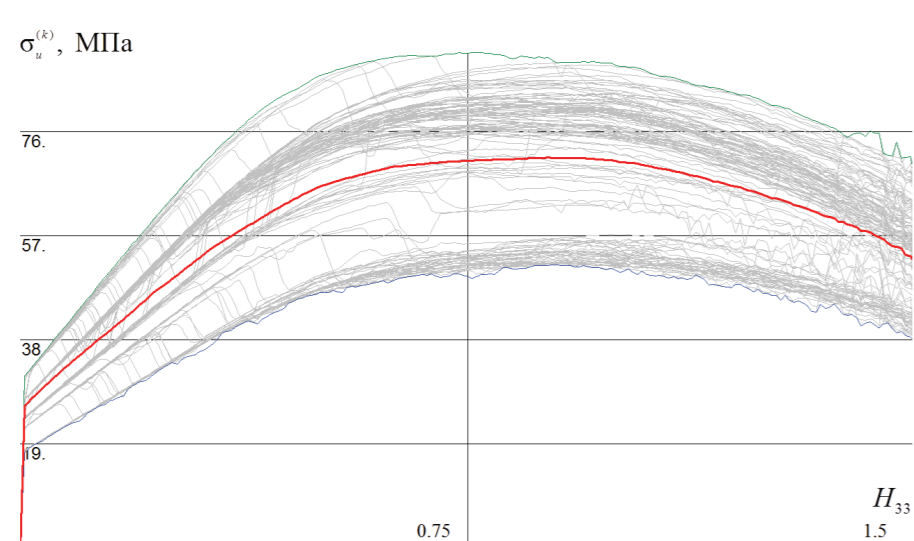


Рис.6. Зависимость интенсивности напряжений в отдельных кристаллитах от накопленной деформации

**преобладание ВДС на первой стадии** – происходят переходы изображающих точек в пространстве напряжений (ИТН) из одного класса напряжений в другой [9]

**активная работа ЗГС на третьей стадии** – смена соседних кристаллитов происходит чаще, что находит отражение и в частых и значительных изменениях мезонапряжений

Модель реализует сложный сценарий деформирования при СП-испытании (при разных скоростях деформации!)

[9] Швейкин А.И., Шарифуллина Э.Р. Вестник Тамбовского государственного университета. – 2013. – Т.18, №4.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

- Предложена **трехуровневая модель на основе физической теории упруговязкопластичности**, учитывающая механизм зернограничного скольжения. Предложено математическое описание **законов внутризерненного дислокационного и зернограничного упрочнения** при деформировании с переходом в режим структурной сверхпластичности.
- Разработаны **алгоритмы реализации модели** с использованием численных методов. Создан **комплекс программ**, реализующих алгоритмы разработанной трехуровневой модели.
- Осуществлена **процедура идентификации и верификации параметров** физической модели на примере одноосного растяжения алюминиевого сплава 1420, полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.