

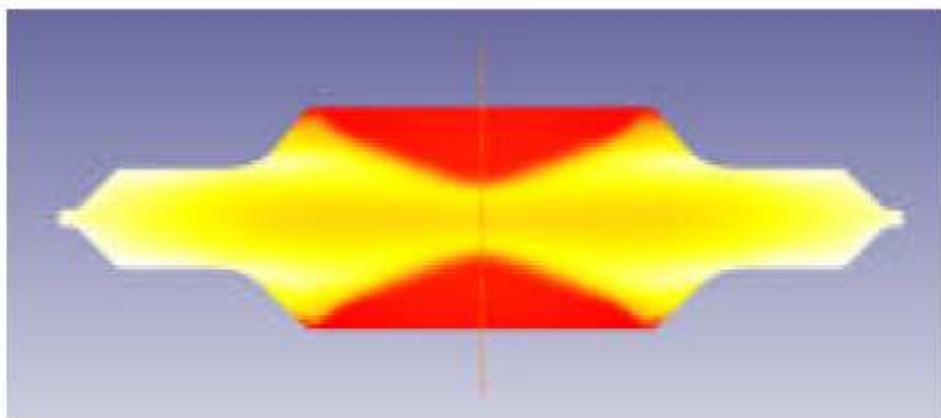
Микроструктура материала представляет данные об изделии непосредственно связанные с его составом и механическими свойствами после обработки. Микроструктура определяет качество изделия. Прогнозирование и управление микроструктурой является первостепенной задачей при разработке успешного технологического процесса и получения изделия с заданными свойствами.

### Моделирование микроструктуры

В DEFORM существует два различных подхода к моделированию развития микроструктуры во время процессов штамповки и термической обработки. Первым подходом является традиционный метод Джонсона-Мейла-Аврами-Колмогорова (Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov или JMAK), который был реализован в DEFORM еще в 1999 году. Вторым подходом к моделированию развития микроструктуры в DEFORM является метод дискретных решеток, реализованный с помощью алгоритма Cellular Automata. Это разработка стала доступна пользователям DEFORM-3D, начиная с версии v6.1.

В методе JMAK окончательный средний размер зерна определяется на основе начального среднего размера зерна, некоторых постоянных значений материала и полей переменных данных, таких как температура, деформация, скорость деформации и время. Так же моделируется рост зерна и кинетика рекристаллизации (в частности динамическая, метадинамическая и статическая). Для прогнозирования развития среднего размера зерна и процента рекристаллизации интересующего материала нужно определить начальный средний размер зерна и разработать уравнения кинетики рекристаллизации. Разработка таких уравнений включает в себя проведение характерных исследований материала для изучения развития размера зерна в зависимости от деформации, температуры и скорости деформации, которые возникают во время процессов штамповки и термической обработки. В базе данных DEFORM, в настоящее время, содержатся два материала со всеми необходимыми уравнениями JMAK для моделирования развития зерна – это материалы уаспалой и Inconel 718. Для вычислений метод JMAK является достаточно эффективным и точным.

На примере показано развитие зерна на последней операции штамповки обычного диска с использованием материала уаспалой. В этой модели зерна маленького размера показаны светлым цветом, а крупные зерна выделены красным цветом.



#### Наш адрес:

ООО «АРТЕХ»  
127015, Москва, ул. Новодмитровская,  
д.5А, стр. 1, оф.1509Б

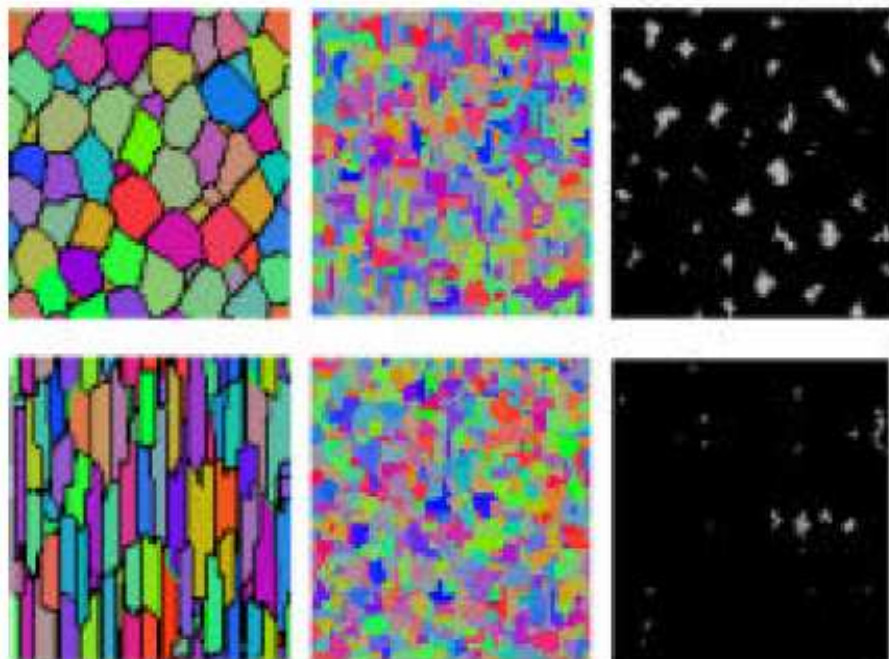
Телефон/факс: (495) 795-64-48

Web: [www.artech-eng.ru](http://www.artech-eng.ru)

E-mail: [info@artech-eng.ru](mailto:info@artech-eng.ru)

Метод JMAK не учитывает формирование неметаллических включений и их влияние на рост зерен. Так же этот метод не учитывает различную форму зерна. Начальная микроструктура с одинаковым средним размером, но с разной формой зерна обладает разной кинетикой развития микроструктуры. Классический метод JMAK не чувствителен к форме зерна и тем самым является ограниченным для применения на производстве.

В этом примере показаны две различные начальные микроструктуры (слева сверху - равноосная, слева снизу - удлиненная). Конечная микроструктура показана на рисунках по центру. Нерекристаллизованные зерна (серый цвет) показаны на правых рисунках.



Для устранения недостатков метода JMAK в DEFORM был реализован метод Cellular Automata (CA), основанный на использовании дискретных решеток. Модель Cellular Automata представляет собой микроструктуру как дискретную решетку регулярно упорядоченных точек. Каждая точка представляет микроструктуру как функцию от кристаллографической ориентации, плотности дислокаций, распределения деформации и т.д. Эта модель, которая явно представляет зерна и границы зерен не как «среднее» значение, более чувствительна к локальным изменениям геометрии и морфологии. Таким образом, в методе СА данные по рекристаллизации и развитию зерна более точные и соответствуют действительности, чем при использовании классического метода JMAK.

Метод СА позволяет моделировать такие явления микроструктуры как упрочнение, восстановление свойств, динамическая рекристаллизация, метадинамическая рекристаллизация, статическая рекристаллизация и рост зерна. Метод СА позволяет учитывать влияние деформации, скорости деформации, температуры, кристаллографической ориентации, разориентации границ зерен и плотности дислокации. Результаты применения метода СА показан ниже. Будущая работа направлена на учет воздействия неметаллических включений и фазовых превращений на развитие размера зерна.

На приведенном ниже примере, на верхнем левом рисунке показана структурная кристаллография ориентированного зерна. Верхний правый рисунок представляет собой карту плотности дислокаций, где темные области – это области с высокой плотностью дислокаций (деформированный материал), а светлые области представляют собой области с низкой дислокацией (рекристаллизованный материал). Схема границ зерна показана на нижнем левом рисунке. А на правом нижнем рисунке показана комбинированная карта ориентации зерна и разориентация границ зерен.

#### Наш адрес:

ООО «АРТЕХ»  
127015, Москва, ул. Новодмитровская,  
д.5А, стр. 1, оф.1509Б

Телефон/факс: (495) 795-64-48

Web: [www.artech-eng.ru](http://www.artech-eng.ru)

E-mail: [info@artech-eng.ru](mailto:info@artech-eng.ru)

Перевод осуществлен компаниями ООО «Артех» и ООО «НТП «РадиалПро».