

УДК: 621.7.014.016.3:519.217

Моделирование процессов осесимметричного деформирования с учетом микроструктуры металла

Д. В. Константинов^{1,а}, К. Бзовски², А. Г. Корчунов¹, М. Пьетчшек²

¹ ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

² Горно-металлургическая академия им. Станислава Сташица,
Польша, 30-059, Краков, аллея Адама Мицкевича, д. 30

E-mail: ^аconst_dimon@mail.ru

*Получено 21 марта 2015 г.,
после доработки 22 мая 2015 г.*

В статье описано современное состояние вопроса компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением, выделены основные проблемные моменты традиционных методов. Описан метод, позволяющий прогнозировать распределение деформации в объеме деформируемого металла с учетом поведенческих особенностей микроструктуры под воздействием деформационной нагрузки. Представлен способ оптимизации ресурсоемкости мультимасштабных моделей посредством использования статистически эквивалентного репрезентативного объема (SSRVE) микроструктуры. Разработанные методы моделирования апробированы на процессе однократного волочения прутка круглого сечения из стали марки 20. В ходе сравнительного анализа моделей макро- и микроуровней были выявлены различия в количественных показателях напряженно-деформированного состояния (НДС) и их локальном распределении по объему. Микроуровневая модель также позволила обнаружить отсутствующие на макроуровне сжимающие напряжения. Применение концепции SSRVE многократно снизило расчетное время модели при сохранении общей точности.

Ключевые слова: мультимасштабное моделирование, волочение, статистически эквивалентный репрезентативный объем, микроструктура, напряженно-деформированное состояние

Modeling of axisymmetric deformation processes with taking into account the metal microstructure

D. V. Konstantinov¹, K. Bzowski², A. G. Korchunov¹, M. Pietrzyk²

¹ *Nosov Magnitogorsk State Technical University, Lenin Street, 38, Magnitogorsk city, Chelyabinsk Region, Russian Federation, 455000*

² *AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland*

Abstract. — The article describes the state of the art computer simulation in the field of metal forming processes, the main problem points of traditional methods were identified. The method, that allows to predict the deformation distribution in the volume of deformable metal with taking into account of microstructure behavioral characteristics in deformation load conditions, was described. The method for optimizing computational resources of multiscale models by using statistical similar representative volume elements (SSRVE) was presented. The modeling methods were tested on the process of single pass drawing of round rod from steel grade 20. In a comparative analysis of macro and micro levels models differences in quantitative terms of the stress-strain state and their local distribution have been identified. Microlevel model also allowed to detect the compressive stresses and strains, which were absent at the macro level model. Applying the SSRVE concept repeatedly lowered the calculation time of the model while maintaining the overall accuracy.

Keywords: multiscale modeling, drawing, Statistically Similar Representative Volume Element, microstructure, stress-strain state

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 897–908 (Russian).

© 2015 Дмитрий Вячеславович Константинов, Кшиштоф Бзовски, Алексей Георгиевич Корчунов, Мачей Пьетчшек

Введение

Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением является одним из ключевых инструментов инженерного проектирования, который позволяет многократно снизить стоимость процесса разработки технологий и режимов производства. Традиционными расчетными методами на данный момент являются метод конечных элементов и метод клеточных автоматов [Константинов, Корчунов, 2015], каждый из которых позволяет достичь необходимой степени точности в зависимости от стоящих перед моделью целей и задач.

При этом классическим концептуальным подходом к моделированию процессов обработки металлов давлением (ОМД) является представление обрабатываемого металла изотропным материалом. Подобный подход позволяет снизить трудозатраты процесса подготовки модели, ее расчетное время, необходимые исходные данные и расчетные ресурсы. С развитием новых современных материалов [Wiewiorowska, 2010] и методов материалобработки требования к точности прогнозирования компьютерных моделей существенно выросли. Появилась объективная необходимость исследования распределения НДС в процессе обработки с учетом микроструктуры обрабатываемого материала.

Это в свою очередь привело к появлению концепции многоуровневого протекания пластической деформации [Панин, Гриняев, Данилов, 1990], а позже — к появлению идеи двухуровневой концепции [Солошенко, 2000] исследования процессов ОМД. Данные концептуальные подходы стали систематизацией сформированных на тот момент представлений об осуществлении и локализации деформации на различных уровнях и доказали тот факт, что изучение микроуровня напряженно-деформированного состояния не может осуществляться без оценки макроуровня, и наоборот. Как следствие, на данный момент появляется все больше работ [Hasani, Mahmudi, Karimi-Taheri, 2009; Park, 2003; Son, Roh, Kang, 2010; Schroeder, Balzani, Brands, 2011], в которых наглядно демонстрируется относительно низкая прогнозирующая способность моделей с исключительно изотропным представлением деформируемого материала. Более того, к ряду современных материалов (таких как стали классов TWIP, DP, TRIP) применить подход механики сплошной среды при моделировании попросту не представляется возможным, так как в случае «усреднения» свойств данных сталей будут не учитываться главные технологические особенности микроструктурного поведения этих материалов [Wiewiorowska, 2010; Watanabe, Setoyama, Nagasako, Iwata, Nakanishi, 2012].

Двухуровневая концепция исследования процессов ОМД легла в основу создания мультимасштабных моделей, расчет которых основан на парном взаимодействии макромоделей (традиционная модель изотропного материала) и модели репрезентативного объема (модель участка микроструктуры). Первая модель позволяет получить общую информацию о макронагрузках и макродеформациях, которые испытывает деформируемый объем, а вторая модель отражает поведение отдельного микрообъема в конкретной точке макромоделей под воздействием этих нагрузок.

Большинство отечественных работ, посвященных моделированию процессов ОМД на микроуровне, были связаны с процессами с относительно небольшим объемом деформируемого металла. Как правило, основное внимание было уделено тонколистовой штамповке или тонкому волочению [Солошенко, 2000; Бунова, Воронин, Гречников, Юшин, 2009; Гук, Смирнов, Кавалла, 2006]. При этом применение данных методик для процессов с относительно большим объемом деформируемого металла и, как следствие, высокой степенью неравномерности деформации приводит к неизбежному уменьшению размера расчетной сетки и, как следствие, росту количества элементов, требуемых расчетных ресурсов и времени. Следовательно, имеющиеся на данный момент методы в своей реализации не всегда являются технически доступными и оперативными. Таким образом, развитие методов мультимасштабного моделирования наряду с их оптимизацией является актуальной теоретической задачей ОМД, одному из вариантов решения которой посвящена данная статья.

Методика моделирования

Авторами предложена методика мультимасштабного моделирования процессов осесимметричного деформирования, включающая в себя следующие шаги:

1. Создание традиционной макромодели с представлением обрабатываемой заготовки как изотропного материала. Для обеспечения более точной передачи данных о напряженно деформированном состоянии между уровнями мультимасштабной модели необходимо увеличить плотность конечно-элементной сетки в местах будущего расчета микроуровневой модели.

2. Для создания репрезентативного объема микроструктуры необходима предельно четкая фотография микроструктуры, полученная в ходе лабораторных металлографических исследований. Размер фотографии корректируется под необходимые размеры репрезентативного объема. Затем посредством использования графических редакторов данную фотографию необходимо преобразовать в бинарное, растровое черно-белое изображение.

3. Полученное изображение микроструктуры конвертируется как геометрический объект в используемый программный комплекс и покрывается расчетной конечно-элементной сеткой, а отдельным микроструктурным составляющим присваиваются механические свойства.

4. При помощи инструментария субмоделирования, в зависимости от используемого программного комплекса, тем или иным способом производится расчет полученной модели.

Необходимо отметить, что базовый репрезентативный объемный элемент и метод его подготовки имеют ряд существенных недостатков:

1. Большое число элементов в модели микроструктурного объема, увеличивающее общее расчетное время.

2. Трудоемкость и сложность подготовки геометрической модели микроструктуры.

3. Отсутствие автоматизации процесса создания репрезентативного объема.

4. Наличие калькуляционных ошибок в отдельных элементах сетки из-за сложности строения геометрии отдельных структурных элементов.

Все обозначенные недостатки делают крайне сложным проведение большого числа расчетов различных технологических вариантов, которые обычно необходимы для анализа того или иного процесса.

Для устранения данных недостатков была использована концепция статистически эквивалентного репрезентативного объемного элемента (SSRVE) [Schroeder, Balzani, Brands, 2011]. Ключевая идея статистически эквивалентного репрезентативного объемного элемента заключается в замене относительно большого базового репрезентативного объема микроструктуры меньшим объемом, но имеющим схожую морфологию и аналогичное поведение в условиях нагрузки. Данная идея была опробована [Brands, Schroder, Balzani, 2011; Rauch, Pernach, Bzowski, Pietrzyk, 2011] применительно к реконструкции микроструктуры DP-сталей в условиях лабораторных тестов на растяжение, сжатие и сдвиг, однако применение этой концепции к условиям сложного НДС в ходе реальных промышленных процессов было осуществлено нами впервые.

Процесс создания SSRVE содержит несколько этапов, представленных на рисунке 1.

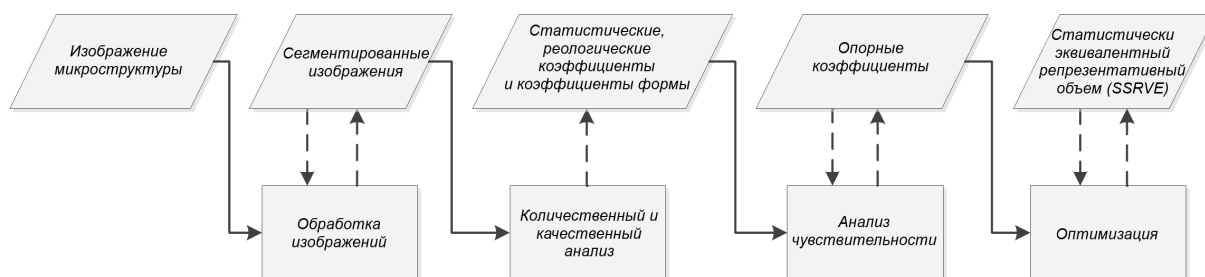


Рис. 1. Схема процесса создания статистически эквивалентного объема

Метод основан на мультикритериальной оптимизации целевой функции, которая представляет собой уравнение, включающее следующие элементы:

$$\Phi = \sqrt{\sum_{i=1}^k w_i \zeta_i^2 + \sum_{i=k+1}^{k+l} w_i \varphi_i^2 + \sum_{s=1}^3 \left(w_s \sum_{j=1}^p \sigma_{sj}^2(\varepsilon_j) \right)}, \quad (1)$$

$$\zeta_i = \frac{\zeta_{iRef} - \zeta_{iSSRVE}}{\zeta_{iRef}}, \quad (2)$$

$$\varphi_i = \frac{\varphi_{iRef} - \varphi_{iSSRVE}}{\varphi_{iRef}}, \quad (3)$$

$$\sigma_{sj} = \frac{\sigma_{sjRef} - \sigma_{sjSSRVE}}{\sigma_{sjRef}}, \quad (4)$$

где уравнение (2) — сравнение коэффициентов формы микроструктурных элементов обычного репрезентативного объема (Ref) и статистически эквивалентного (SSRVE); уравнение (3) — сравнение статистического распределения микроэлементов в обычном репрезентативном объеме (Ref) и статистически эквивалентном (SSRVE); уравнение (4) — сравнение напряжений, необходимых для осуществления трех тестовых видов деформаций (сжатие, растяжение и чистый сдвиг) в обычном репрезентативном объеме (Ref) и статистически эквивалентном (SSRVE); w — весовой показатель; k — номер коэффициента формы, s — номер реологической кривой, p — номер итерации в численном расчете.

В качестве сравнительных критериев формы одновременно использовались следующие критерии [Matusiewicz, Czarski, Adrian, 2007]: Malinowska factor (5), Blair-Bliss Factor (6), Danielsson factor (7), Haralick factor (8):

$$\zeta_M = \frac{L_m}{2\sqrt{\pi S_m}} - 1, \quad (5)$$

$$\zeta_B = \frac{S_m}{\sqrt{2\pi \sum_{i=0}^n r_i^2}}, \quad (6)$$

$$\zeta_D = \frac{S_m^3}{\left(\sum_{i=0}^n l_i \right)^2}, \quad (7)$$

$$\zeta_H = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=0}^n d_i \right)^2}{n \sum_{i=0}^n d_i^2 - 1}}, \quad (8)$$

где L_m — пиксельный периметр зерна, S_m — пиксельная площадь зерна, l — кратчайшее пиксельное расстояние от центра зерна до его границы, d — максимальное пиксельное расстояние между центром зерна и точкой его периметра, r — расстояние от пикселя до центра масс объекта.

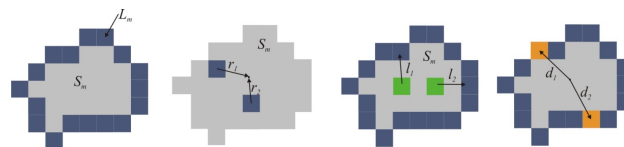


Рис. 2. Параметры критериев формы

Для получения реологических кривых базовый репрезентативный объем подвергался трем тестам (рис. 3).

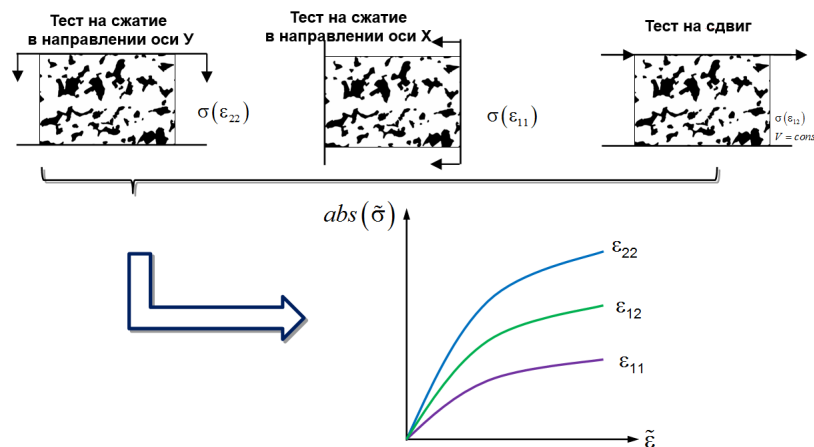


Рис. 3. Общая схема получения реологических кривых

Реологические кривые были описаны следующим образом

$$\tilde{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{S} \oint_S \varepsilon_{ij} dS, \quad (9)$$

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \frac{1}{S} \oint_S \sigma_{ij} dS. \quad (10)$$

Данные уравнения рассчитываются в каждой итерации численного моделирования (S — это площадь микроструктуры или SSRVE образца). Неоднородные б-сплайны (NURBS) были выбраны в качестве репрезентаций зерен. Исследования, проведенные в ходе разработки метода, показали, что 12 контрольных точек достаточно для репрезентации традиционной двухфазной структуры [Rauch, Pernach, Bzowski, Pietrzyk, 2011]. При данном подходе формы зерен могут быть легко модернизированы посредством изменения позиций контрольных точек на ограниченной поверхности. Главной целью процесса оптимизации является модификация позиции контрольных точек для достижения формы, которая будет давать минимальное значение целевой функции. Для решения данной оптимизационной задачи были использованы генетические алгоритмы.

Апробация методов

Для апробации предложенной методики был выбран процесс осесимметричного деформирования методом волочения. Процесс однократного волочения прутков (с диапазоном размеров от 5 до 40 мм) с относительно невысокими обжатиями (1–2 мм) является одним из наиболее важных процессов для современного отечественного и зарубежного машиностроения [Гун, Корчунов, Полякова и др., 2011; Корчунов, Чукин, Гун, Полякова, 2012; Sadok, Luksza, Majta, 1994]. В данном случае конечным продуктом выступают различные оси, валы и стержневые конструкции, которые обычно используются под действием статических и циклических нагрузок на протяжении всего срока эксплуатации.

Изучали процесс волочения прутков из низкоуглеродистой нелегированной стали марки 20 с феррито-перлитной структурой (таблица 1, рисунок 4) с исходного диаметра 38 мм на диаметр 35 мм.

Таблица 1. Химический состав

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.17–0.24	0.17–0.37	0.35–0.65	< 0.3	< 0.04	< 0.035	< 0.25	< 0.3	< 0.08

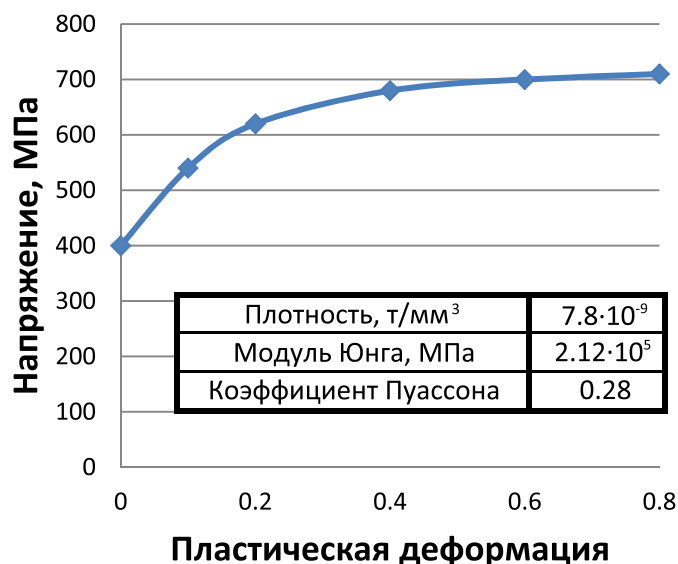


Рис. 4. Свойства материала

Для расчета использовался решатель Standart программного комплекса Abaqus 6.14-1. Передний конец стержня двигался со скоростью 30 м/мин. Для достижения высокой точности передачи данных между уровнями подмоделями были созданы дополнительные регионы повышенной плотности сетки по всему поперечному сечению образца. Общий вид конечно-элементной (КЭ) модели представлен на рисунке 5.

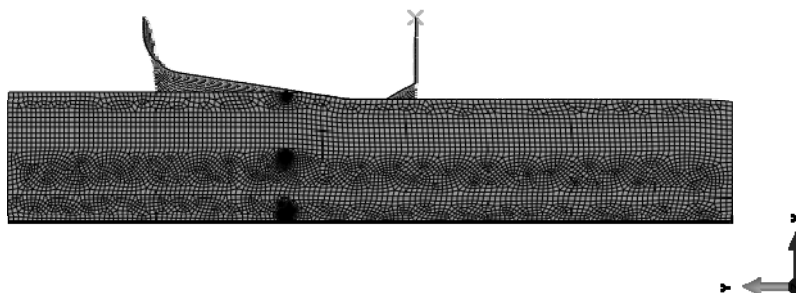


Рис. 5. Общий вид сечения модели стержня

Базовый репрезентативный объемный элемент имел размер 0,5×0,4 мм, который соответствовал стандартному размеру фотографий микроструктуры стали марки 20. Для создания геометрии модели изображение микроструктуры было обработано стандартными фильтрами в графическом редакторе, вычищено от незначительных несовершенств в виде сверхмелких включений и преобразовано в растровое бинарное черно-белое изображение. После всех процедур предварительной обработки процентное соотношение между объемами структурных элементов не изменилось. Полученное изображение было покрыто КЭ сеткой с треугольными элементами.

Для сравнительного анализа макро- и микромоделей исследовались осевые продольные (s22) и радиальные (s11) напряжения, как наиболее важные с технологической точки зрения. Микро модель, в отличие от макро модели, позволила определить локализацию высоких значений продольных растягивающих напряжений в зернах перлита и расположенных вблизи их по-

верхности областях ферритной матрицы, а также локализацию высоких значений данных напряжений вблизи оси прутка. При этом локализованные на оси прутка в отдельных фазах напряжения имели уровень, достаточный для начала потенциального трещинообразования. Форма данных локализаций напоминала классические шевронные разрывы, которые обычно имеют место в ходе реальных промышленных процессов осесимметричного деформирования.

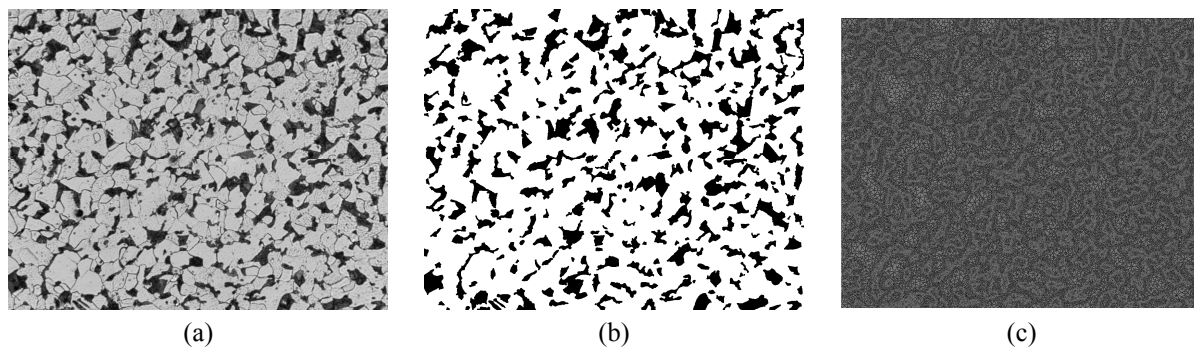


Рис. 6. Стадии создания модели: а) фото микроструктуры; б) черно-белая версия; в) КЭ

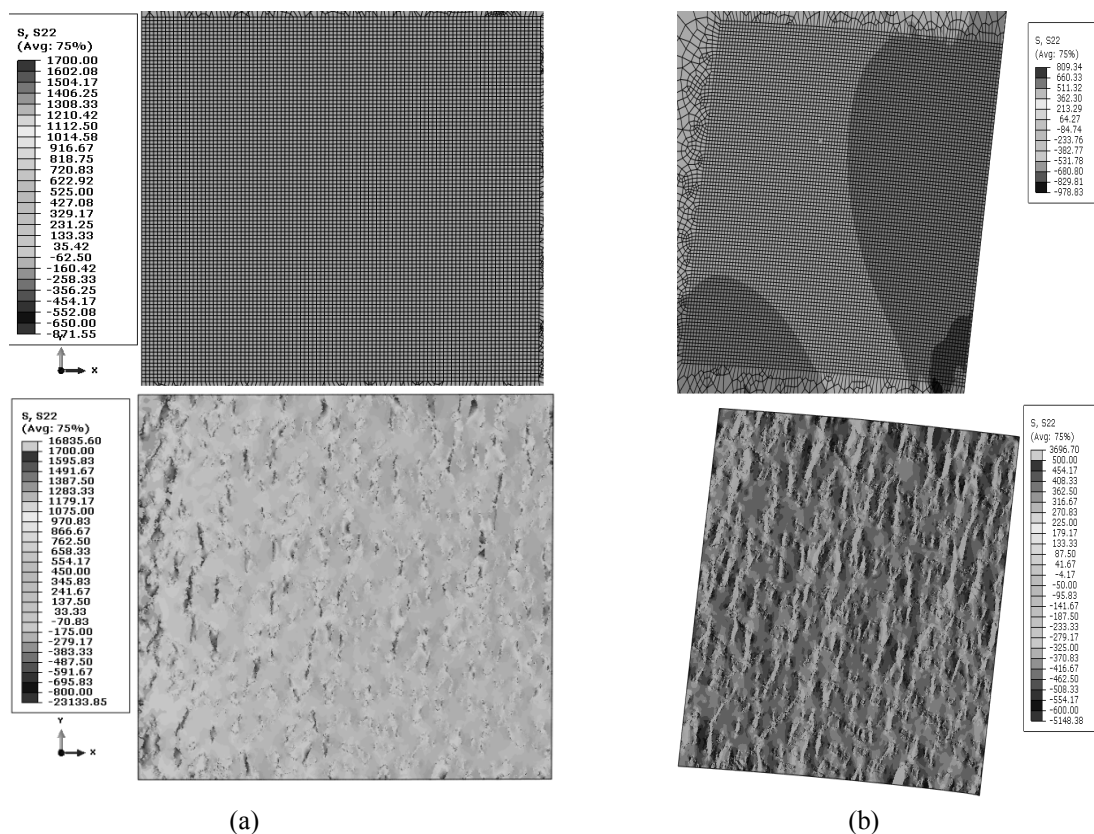


Рис. 7. Распределение продольных напряжений в макро- и микромодеи: а) в центральных слоях; б) на поверхности

Совершенно иная ситуация наблюдалась в отношении радиальных напряжений. Средний уровень радиальных напряжений в обеих моделях был также сравнительно схожим. При этом макромоделю не позволила обнаружить высокие сжимающие напряжения и их распределение вдоль всего репрезентативного объема. То есть согласно модели, в которой металл представлялся как изотропный материал, деформационного воздействия в центре теоретически быть не должно. Однако, как правило, при проверке микротвердости по поперечному сечению прутков

после процесса волочения микротвердость в центре прутка также возрастает, что противоречит результатам макромодели. Микромодель, наоборот, позволяет наблюдать сжимающие деформации и напряжения.

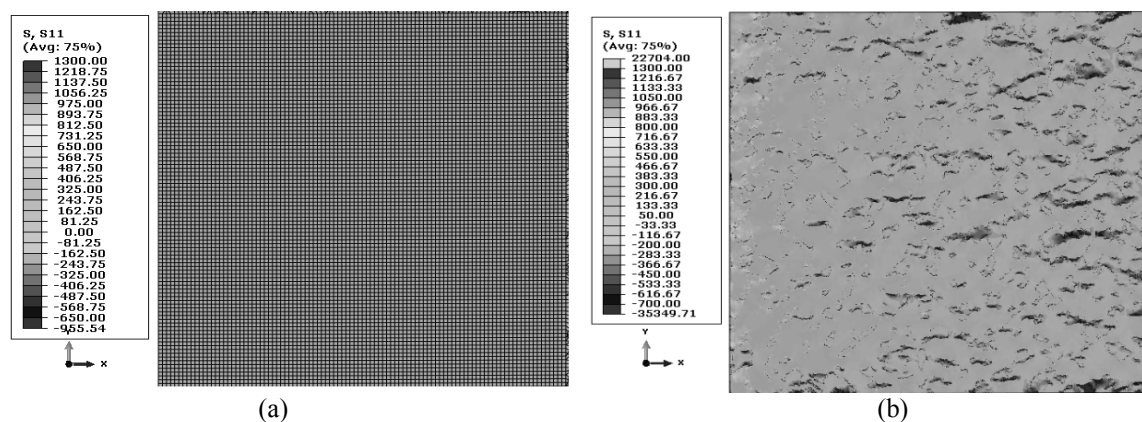


Рис. 8. Распределение радиальных напряжений в макро (а) и микро (б) моделях

Данное поведение микромодели может быть объяснено тем, что на микроуровне в обычных углеродистых сталях мы имеем дело с композитом из мягкой и твердой фаз. При этом обычно в ходе моделирования процессов металлообработки с позиции изотропного материала принимается лишь усредненный уровень свойств. Следовательно, в случае моделирования подобных материалов с принципиально различающимся поведением фаз в условиях деформационной нагрузки разница в результатах между макро- и микроуровнями моделей будет тем больше, чем меньше будет разница между процентным соотношением этих фаз. Так, например, высоко- или низко- углеродистые стали на микроуровне являются материалами, максимально приближенными по свойствам к гомогенным. Однако при моделировании процессов обработки среднеуглеродистых сталей, где микроструктурные компоненты находятся в более уравновешенных пропорциях и формируют более сложные композиции, классическая кривая упрочнения гомогенного материала будет значительно снижать прогнозирующую способность результатов модели.

При этом расчет такой модели с высоким числом элементов (в нашем случае количество элементов составило 284 587) даже при условии наличия высокопроизводительных компьютерных ресурсов может занимать длительное время. Для устранения данной проблемы к условиям описанной задачи была применена ранее упомянутая концепция SSRVE. Эволюция статистически эквивалентного репрезентативного объема в ходе процесса оптимизации представлена на рисунке 9.

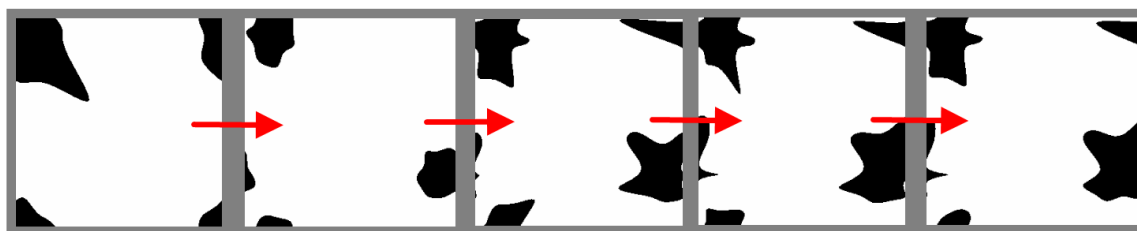


Рис. 9. Стадии эволюции статистически эквивалентного репрезентативного объема

Результаты оптимизации поведения под нагрузкой в базовых тестах представлены на рисунке, из которого следует, что поведение полученного статистически эквивалентного объема практически соответствует поведению базового репрезентативного объема с погрешностью 2,5 %. При этом следует отметить, что размер SSRVE составил лишь $0,02 \times 0,02$ мм.

Результаты сравнения полученного распределения напряженного состояния и затраченного расчетного времени представлены на рисунках 10 и 11. При сохранении относительной точности

в абсолютных значениях параметров НДС (рис. 11а) удалось снизить расчетное время модели более чем в 60 раз (рис. 11б).

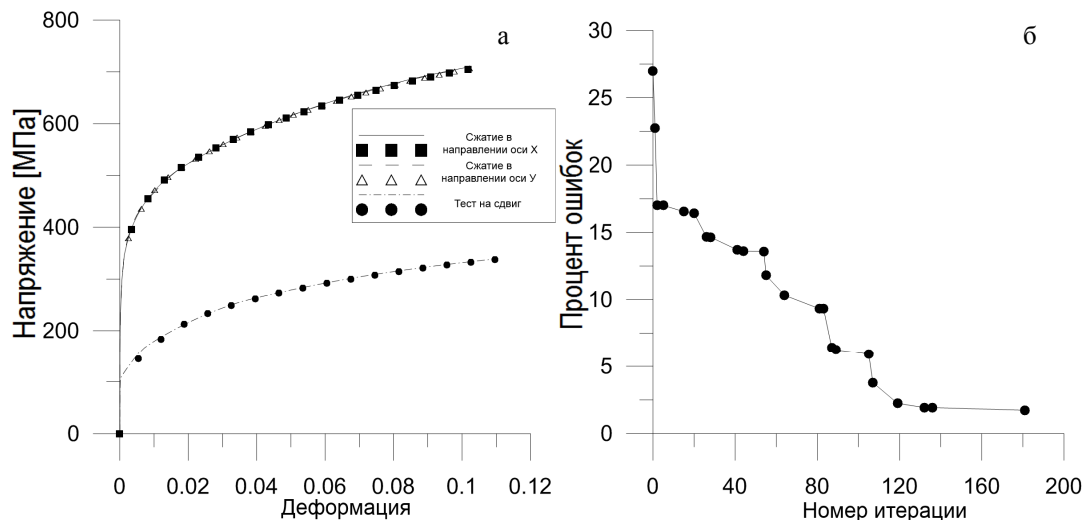


Рис. 10. Результаты оптимизации поведения под нагрузкой в базовых тестах (а), процент ошибок в ходе процесса оптимизации (б)

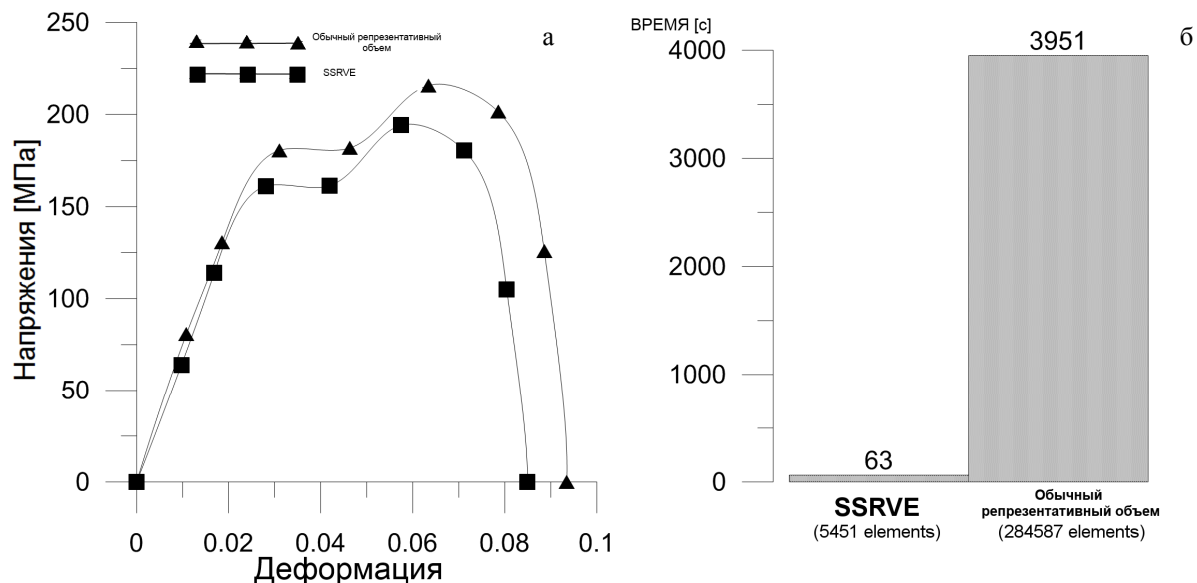


Рис. 11. Сравнительный анализ моделей микроструктуры и SSRVE: а) сравнение кривых течения; б) сравнение расчетного времени модели

Заключение

Мультимасштабное моделирование с использованием базового репрезентативного объема позволяет повысить достоверность прогноза КЭ модели процесса металлообработки. Переход на микроуровень моделирования процесса волочения прутка позволил не только наблюдать локализации напряжений в отдельных фазах, но и обнаружить места неблагоприятного НДС, инициировавшего вероятность потенциального зарождения трещинообразования вблизи оси прутка, которые модель с изотропным материалом не продемонстрировала. Прогнозирующая способность подобных микромоделей возрастает при изменении процентного соотношения фаз исследуемого металла и его структурной неоднородности. Однако такой метод моделирования

не всегда является оптимальным с позиции трудозатрат и требуемых расчетных ресурсов. Применение SSRVE позволяет полностью автоматизировать процесс создания модели микроструктуры, сократить расчетное время модели и снизить требуемые компьютерные ресурсы при сохранении общей точности результатов. Перспективным направлением будущих исследований является изучение микроструктурного поведения в условиях реальных производственных процессов структурно более сложных материалов (например, TRIP, TWIP стали), так как проектирование новых технологических процессов ОМД для таких сталей в принципе невозможно без учета микроуровня и может быть реализовано при помощи предложенных в данной работе методов.

Список литературы

- Бунова Г. З., Воронин С. В., Гречников Ф. В., Юшин В. Д. Компьютерное моделирование процесса вытяжки полых стаканчиков из сплава амгб с учетом реальной структуры материала // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2009. — Т. 11, № 3-1. — С. 219–224.
- Гук С. В., Смирнов О. М., Кавалла Р. Неравномерность деформации компонентов микроструктуры многофазных сталей при оценке предельной формруемости листового металла // Металлург. — 2006. — № 5. — С. 29–32.
- Гун Г. С., Корчунов А. Г., Полякова М. А. и др. Стальная проволока: монография. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2011. — 689 с.
- Константинов Д. В., Корчунов А. Г. Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — № 1. — 2015. — С. 36–43.
- Корчунов А. Г., Чукин М. В., Гун Г. С., Полякова М. А. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства. — М. : Издательский дом «Руда и Металлы», 2012. — 164 с.
- Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Данилов В. И. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. — Новосибирск : Наука, 1990. — 252 с.
- Солошенко А. Н. Разработка метода моделирования напряженно-деформированного состояния при обработке давлением структурно-неоднородных материалов: автореферат диссертации по металлургии, 05.16.05. Солошенко Алексей Николаевич. — Екатеринбург, 2000. — 19 с.
- Brands S., Schroder J., Balzani D. Statistically similar reconstruction of dual-phase steel microstructures for engineering applications // Proc. CMM-2011 Computer Methods in Mechanics, Warsaw (CD ROM).
- Brands S., Schroder J., Balzani D. On the incorporation of microstructural information in dual phase steel simulations, Proc. 10th ICTP, eds, Hirt, G., Tekkaya, A. E., Aachen. — 2011. — P. 823–826.
- Hasani G., Mahmudi R., Karimi-Taheri A. On the strain inhomogeneity in drawn copper wires // International Journal for Materials Forming. — 2011. — No. 80. — P. 388–391.
- Matusiewicz P., Czarski A., Adrian H. Estimation of materials microstructure parameters using computer program SigmaScan Pro // Metallurgy and foundry engineering. — 2007. — P. 33–40.
- Park H., Lee D. The evolution of annealing textures in 90 pct drawn copper wire // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2003. — 34A. — P. 531–541.
- Rauch L., Pernach M., Bzowski K., Pietrzyk M. On application of shape coefficients to creation of the statistically similar representative element of DP steels // Computer Methods in Materials Science. — 2011. — 11. — P. 531–541.
- Sadok, L., Luksza, L., Majta, J. Inhomogeneity of mechanical properties in stainless steel rods after drawing // Journal of Materials Processing Technology. — 1994. — 44. — P. 129–141.

- Schroeder J., Balzani D., Brands S.* Approximation of random microstructures by periodic statistically similar representative volume elements based on lineal-path functions, *Archives of Applied Mechanics*. — 2011. — 81. — P. 975–997.
- Son S.-B., Roh H., Kang S.-H.* Relationship between microstructure homogeneity and bonding stability of ultrafine gold wire // *Journal of Materials Science*. — 2010. — 45. — P. 236–244.
- Watanabe I., Setoyama D., Nagasako N., Iwata N., Nakanishi K.* Multiscale prediction of mechanical behavior of ferrite–pearlite steel with numerical material testing // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. — 2012. — 89. — P. 829–845.
- Wiewiorowska, S.* Determination of content of retained austenite in steels with TRIP effect deformed at different strain rates, *Steel Research International*, 81, spec. issue Conf. Metal Forming. — 2010a. — P. 262–265.
- Wiewiorowska, S.* The influence of strain rate and strain intensity on retained austenite content in structure of steel with TRIP Effect, *Solid State Phenomena*. — 2010b. — 165. — P. 216–222.