

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

## МУЛЬТИМАСШТАБНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Константинов Д.В., Корчунов А.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

**Аннотация.** В статье приведен обзор основных научных направлений в сфере компьютерного моделирования структурной композиции металла в ходе обработки. Выявлены основные достоинства и недостатки современных методов, рассмотрено их прикладное применение в различных сферах ОМД, обозначены ключевые направления развития и проблемы вопроса. Предложен метод реконструкции структуры металлов.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, микроструктура, обработка металлов давлением, репрезентативный объем.

### Введение

Изменение параметров микроструктуры материала в процессах обработки металлов и сплавов давлением определяет конечные технологические и эксплуатационные свойства полупродукта и готовой продукции. Многочисленные исследования показывают, что изучение деформационных процессов, происходящих в металле, невозможно без перехода на микроуровень, так как именно параметры микроструктуры являются предельно емким «индикатором» технологических изменений в ходе обработки. При этом классические теории, базирующиеся только на механике сплошной среды, в силу принимаемых допущений могут обладать более низкой достоверностью прогноза относительно моделей с учетом микроструктурной репрезентации.

В свою очередь, распределение микроструктурных составляющих имеет двойственное технологическое значение. С одной стороны, исходная неравномерность распределения микроструктурных компонентов может привести к неравномерному ходу пластической деформации или структурно-фазовых превращений в ходе последующей обработки; с другой стороны, в ходе осуществления такой неравномерной обработки изначально неравномерное распределение микроструктуры может либо усугубиться, либо, наоборот, быть в определенной степени устранено. Данный момент является актуальным с позиции концепции технологической наследственности в прикладных исследованиях [1–3].

### Современное состояние и перспективы развития моделирования процессов обработки металлов давлением

Современный этап развития методов моделирования процессов ОМД характеризуется появлением большого количества работ, в которых тем или иным способом предпринимаются попытки связать особенности строения материалов с характером их деформации [4–11]. В данных работах авторам удалось концептуально обозначить уровни протекания процессов пластической деформации и экспериментально связать явления локализации деформации с неравномерностью распределения микроструктурных параметров.

Также рассмотрение процессов ОМД с позиции микроструктурной анизотропии заготовки и ее последующей эволюции приведено в работах [10–12]. Анализ процесса волочения золотой проволоки с учетом несовершенств микроструктурной организации заготовки приведен в работе японских ученых [13]. В работе [14] приведены результаты изучения вопроса зависимости между микроструктурной неоднородностью проволоки и стабильностью процесса ее обработки давлением. Данные работы позволили оптимизировать действующие производственные технологии с позиции микроструктурной анизотропии материала. При этом ключевым инструментом в данном случае выступает компьютерное моделирование посредством современных программных комплексов.

Работы [15–18] посвящены разработке методик создания конечно-элементных моделей с воссозданием микроструктурной композиции на примере алюминиевых сплавов. Главным ре-

зультатом данных работ стало изучение напряженно-деформированного состояния в модели репрезентативного объема металла и сравнительный анализ полученного состояния с классической моделью изотропного материала. Предложенные авторами методики позволяют в предельной точности воссоздать реальную микроструктуру металла, наблюдаемую в ходе конкретных металлографических лабораторных исследований, при использовании относительно простых программных средств. Аналогичный метод получил развитие в исследованиях [19], в которых указанный способ был математически формализован. Однако следует отметить, что предложенные способы создания КЭ-моделей отличаются трудоемкостью процесса подготовки полученных в ходе металлографических исследований данных, многократно будут усложняться при моделировании микроструктурно более сложных металлов (например, двух-, трехфазные металлы или их модели с учетом металлических включений), а также не учитывают изменение микроструктурного строения металла и пространственной ориентации микроструктурных компонентов в ходе пластической деформации.

Принципиально другой способ представления в компьютерном моделировании микроструктурного строения металла предложен в работах [20–21], в которых построение неоднородного объема металла основывалось на использовании репрезентативного кубического объема со случайным распределением составляющих, характеризующих их объемными долями. Геометрия микроструктурных составляющих была основана на простых геометрических элементах (пирамиды и конусы). Данная методика в сравнении с предыдущей является менее трудоемкой, но при этом позволяет строить 3D-модели исследуемых структур любой сложности и изучать напряженно-деформированное состояние отдельных структурных составляющих. При этом для многих материалов подобные допущения могут быть критическими с позиции достоверности прогноза поведения микроструктуры под технологическим воздействием.

В работах [22–23] предложен автоматизированный метод компьютерной репрезентации микроструктурного объема металла, который позволяет на основании тесного программного взаимодействия металлографического оборудования и САД системы инженерного проектирования Unigraphics NX3 создать сверхточную, адаптированную для последующего конечно-элементного моделирования модель микроструктуры. Высокая точность результатов данной системы основывается на сложном реверс-

инжиниринговом математическом аппарате, включающем такие этапы обработки металлографических данных, как: фильтрация данных (уменьшение объема шумов), идентификация массива точек и вершин, NURBS-функция (неоднородный рациональный B-сплайн) и удаление объемных перекрытий структурных составляющих. При этом использование данного метода без наличия программной среды или соответствующего оборудования невозможно. Этот аспект становится особенно важным, например, при необходимости простого воссоздания микроструктуры металла из набора статистических данных, которые могут быть получены более простыми металлографическими методами.

Однако при исследовании НДС переход при моделировании исключительно на микроуровень (в отрыве от общего макросостояния деформируемого тела) может быть не только не показательным с позиции достоверности прогноза, но и вовсе не нести прикладного смысла. Поэтому в начале века зарождается идея двухуровневой концепции [24] исследования НДС, которая получила серьезное развитие в современной теории мультимасштабного моделирования в промышленной информатике.

Суть мультимасштабного компьютерного моделирования заключается в парном взаимодействии классической модели изотропной среды и модели репрезентативного объема (RVE, Representative Volume Element). Первая позволяет получить общие закономерности распределения НДС по всему объему деформируемого металла, а вторая – произвести анализ поведения конкретного точечного репрезентативного объема под воздействием такой макронагрузки (рис. 1).

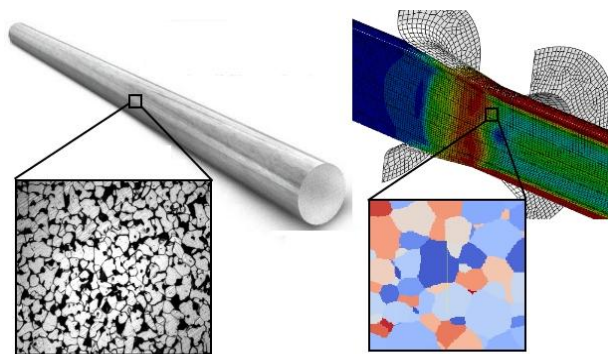


Рис. 1. Концептуальная схема мультимасштабного моделирования

В зависимости от масштабов воссоздаваемых элементов и специфики моделируемых процессов обработки для калькуляции подобных моделей могут использоваться самые различные математические методы: FE, XFE, CA, MD и их комбинации (рис. 2) [25].

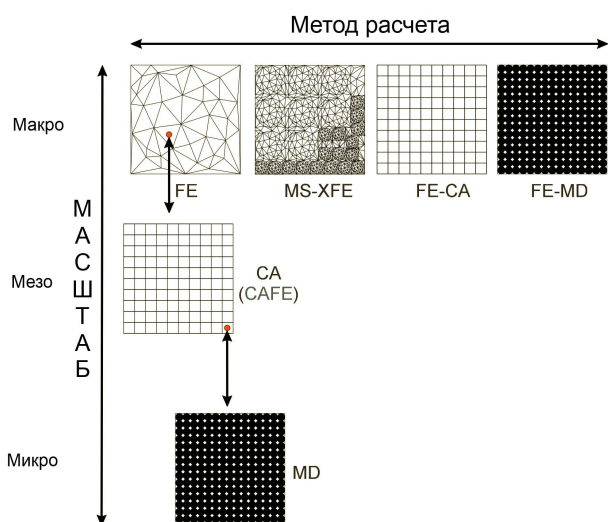


Рис. 2. Классификация мультимасштабных моделей

В работе [26] проводился анализ процессов инициализации разрушений различной природы на микроструктурном уровне в ходе моделирования реологических испытаний образцов нержавеющей стальной проволоки. По результатам работы был проведен сравнительный анализ экспериментальных данных, результатов моделирования на макроуровне и микроуровне. Результаты сравнения показали, что моделирование поведения материала на уровне микроструктуры позволяет более точно обнаружить момент инициализации микротрещины, что невозможно при моделировании изотропной среды.

В работе [27] проводился анализ поведения столбчатых структур под воздействием осевых напряжений и соотнесение его результатов с расчетной моделью изотропного образца, в результате чего статистически была продемонстрирована высокая предсказательная способность модели с микроструктурной репрезентативной составляющей.

В работах [28–30] на основе мультимасштабного моделирования была обоснована его перспективная роль для изучения процессов измельчения аустенита и выявления закономерностей его поведения при легировании.

Также двухуровневая концепция была успешно апробирована при исследовании поврежденности бетонных панелей, армированных микрофиброй [31–32]. Переход на микроструктурный репрезентативный уровень в компьютерном моделировании осесимметричной нагрузки бетона при сравнительном анализе с данными физического моделирования позволил повысить достоверность прогнозирования момента наступления первого разрушения в 7 раз.

Мультимасштабное моделирование, реализованное посредством совмещенного метода кле-

точных автоматов и конечных элементов [33–34], позволило численно формализовать механизм распада аустенита и поведение стали типа DP при различных технологических режимах термомеханической обработки.

В работе [35] было изучено поведение наноструктурированной двухфазной стальной микроструктуры. Сравнительный анализ прогноза расчетной модели и экспериментальных данных показал крайне высокую степень достоверности.

Таким образом, современная методология проектирования технологических процессов с позиции создания НДС, благоприятного для достижения технологических целей, обязана учитывать преобразования на микроуровне обрабатываемого металла, но при этом исключительно в парном взаимодействии с макроуровнем.

Особенно остро данный нюанс проявляется при технологических процессах обработки металлов давлением (ОМД) с заведомо высокой степенью неравномерности.

Примером такого процесса может являться однократное волочение с малыми обжатиями (калибрование) горячекатаной заготовки (диапазон размеров от 5 до 40 мм и более) после предварительного травления или механической очистки поверхности. Данный вид продукции имеет важное значение для отечественной и зарубежной машиностроительной, военной и автомобильной промышленности. Конечными продуктами в данном случае становятся различного рода оси, валы и стержневые конструкции, которые должны подвергаться циклическим и статическим нагрузкам в ходе всего периода эксплуатации. По этой причине неравномерность механических свойств вследствие неравномерности деформации является критическим моментом в оценке потенциальной эксплуатационной надежности готовой продукции.

Немаловажным аспектом данного технологического процесса являются применяемые материалы. В отечественной промышленности наибольшую часть производственных объемов занимает продукция из классических низко- и среднеуглеродистых марок сталей, которые обладают достаточно простым микроструктурным строением (как правило, это различные процентные соотношения двух структурных составляющих). В зарубежной промышленности номенклатура материалов более широка и включает в себя такие современные материалы, как TRIP, TWIP и DP стали [36–41], которые обладают более высокой технологической гибкостью благодаря сложной метастабильной микроструктуре. Например, в ходе обработки TRIP сталей остаточный аустенит превращается в мартенсит, вследствие чего данные стали приобретают одновременно повышенную пластичность и прочность (относительно рядовых конструкционных и низколегированных сталей). Таким образом, при-

обрабатываемая при обработке давлением неравномерность деформации потенциально может привести к относительно высокой разнице механических свойств в различных частях обрабатываемого материала вследствие различного количества преобразованных структурных элементов. При этом стоит отметить, что моделирование процессов деформационной обработки на макроуровне никак не учитывает сложное поведение микроструктуры таких сталей, а использует лишь кривые упрочнения, которые не отображают общей природы происходящих в этих сталях изменений. Поэтому обоснованным является гипотеза о том, что НДС на микроуровне таких сталей будет обладать численным уровнем и распределением, отличными от макроуровня, а следовательно, это позволит повысить степень достоверности прогноза конечных механических свойств металла.

Основной проблемой создания модели микроструктуры любого материала является его удельное количество структурных составляющих на единицу микрообъема. Структурные составляющие расположены в материале хаотично, но при этом имеют определенные ограничения по размеру, базовой форме и общей ориентировке в пространстве. Ручное создание подобной геометрической модели – сверхтрудоемкая задача, поэтому очевидным решением данной проблемы является использование статистически-вероятностных математических методов. Так, построение такой геометрической модели было автоматизировано за счет использования классических методов Монте-Карло, которые основаны на многоповторных циклах реализации случайного процесса. При этом сам циклически повторяемый процесс или функция создавался таким образом, чтобы результат от его реализации совпадал с аналогичными величинами решаемой задачи. Таким образом, результаты материаловедческих исследований (средний размер зерна, геометрические параметры его пространственной ориентировки и т.д.) могут выступать в качестве вероятностных характеристик решаемой задачи.

Дополнив данную модель топографией, созданной на основе функционалов Минковского, в результате получили геометрический объем, заполненный случайно ориентированными в пространстве элементарными объемными геометрическими фигурами (эллипсоиды, супер эллипсоиды, октаэдры и т.д.). После этого посредством корректировочных итераций исключили из всех созданных геометрических фигур перекрытые части объемов.

При этом в качестве ограничений, включенных в вероятностные характеристики решаемой задачи, могут выступать и данные о пространственной ориентации структурных составляющих, полученные в ходе таких современных ме-

тодов металлографического анализа, как дифракция отражённых электронов (EBSD-анализ).

Так, для апробации предлагаемого способа создания RVE [42] была выбрана сталь 20, фотография микрошлифа которой приведена на рис. 3.

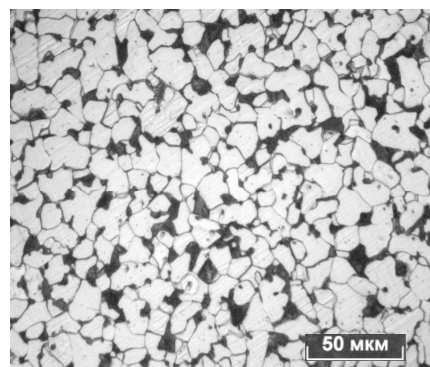


Рис. 3. Изображение микроструктуры, полученное посредством металлографических исследований

В качестве данных использовали эмпирически полученные размеры зерен. Размер репрезентативного объема был выбран из соображений максимального использования аппаратных мощностей расчетной машины (Intel i7, 10Gb RAM) – 700x700x700 вокселей. Количество итераций – 1000000. При этом следует отметить тот факт, что подавляющее большинство зарубежных исследовательских центров используют для расчетных работ кластерные компьютерные станции и суперкомпьютеры (например, комплекс Cyfronet Горно-металлургической академии им. Станислава Сташица в Кракове, Польша).

В результате были получены геометрические модели стали 20, представленные на рис. 4.

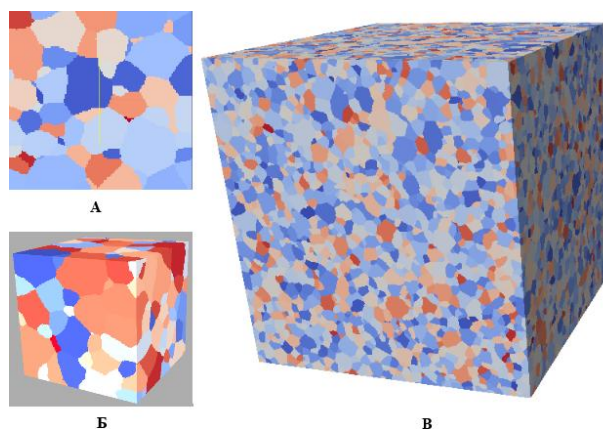


Рис. 4. Репрезентация реальной структуры стали 20: А – 2D-модель структуры стали 20; Б – 3D-модель структуры стали 20 (3300 зерен); В – 3D-модель структуры стали 20 (41798 зерен)

Таким образом, при наличии статистической информации о размерных параметрах микроструктуры становится возможным построение

как 2D, так и 3D модели изучаемой структуры. Однако при наличии возможности такого металлографического исследования, как EBSD-анализ эти модели могут быть уточнены посредством метода реверс-инжиниринга.

Полученные модели могут быть адаптированы для конечно-элементного моделирования в современных программных продуктах, что позволит оценивать напряженно-деформированное состояние на микроуровне обрабатываемого металла. Следовательно, использование данного метода микроструктурной репрезентации металла открывает перспективы исследования изменения ориентации микроструктурных составляющих в ходе пластической деформации.

### Заключение

Развитие методов компьютерного моделирования структурного строения металлических материалов является крайне актуальной задачей. При этом наметилась тенденция к максимальному приближению результатов моделирования микроструктуры к реальности за счет совершенствования методологии и принципов создания геометрических моделей структур. Однако подавляющее большинство описанных в литературе методов компьютерной структурной репрезентации отличаются высокой трудоемкостью процесса воссоздания стохастически распределенных в объеме металла структурных элементов. Следовательно, дальнейшее развитие данного направления в компьютерном моделировании должно быть направлено на автоматизацию и упрощение процесса создания мультимасштабных моделей при сохранении высокого уровня их репрезентативной точности. В настоящей работе был предложен относительно простой метод построения геометрических моделей репрезентативных структурных объемов для последующего конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния обрабатываемого металла. Предложенный метод лишен ключевых недостатков современных методов структурной репрезентации, а именно позволяет воспроизводить структуры как из статистических данных о размерных параметрах микроструктуры, так и из результатов более сложных металлографических исследований, причем с относительно низкой трудоемкостью. Подобный подход к моделированию структуры металла, в свою очередь, может повысить степень достоверности прогноза зависящих от параметров микроструктуры механических свойств и градиента их распределения по объему заготовки.

### Список литературы

1. Анализ метода непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки с использованием концепции технологического наследования / Чукин М.В., Корчунов А.Г., Полякова М.А., Гулин А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им.Г.И. Носова. 2012. № 4. С. 61-65.
2. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства / Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2012. 164 с.
3. Technological Inherited Connections in Continuous Method of Deformational Nanostructuring/ Корчунов А.Г., Полякова М.А., Гулин А.В., Константинов Д.В. // Applied Mechanics and Materials Vol. 555 © (2014) Trans Tech Publications Switzerland, pp. 401–405. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.555.401
4. Кукса Л.В., Евдокимов Е.Е. Разработка конечно-элементной модели и метода расчета элементов конструкций из структурно-неоднородных материалов с факторами концентрации напряжений // Изв. вузов. Строительство. 2002. № 5. С.16–21.
5. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990. 252 с.
6. Пашков П.О. Разрыв металлов. Л.: Судпромгиз, 1960. 243 с.
7. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материала при сложном напряженном состоянии. Киев: Наук. думка, 1976. 415 с.
8. Рыбалко Ф.П. Распределение неоднородностей пластической деформации // Изв. вузов. Физика. 1959. № 1. С. 6–14.
9. Фридман Я.Б., Зилова Т.К., Демина Н.И. Изучение пластической деформации и разрушения методом катанных сеток. М.: Оборонгиз, 1962. 188 с.
10. Microstructure and texture evolution of cold drawing <110> single crystal copper / Chen Jian, Yan Wen, Li Bing, Ma XiaoGuang, Du XinZhi & Fan XinHui// Science China. Technological Sciences. June 2011, vol. 54, no. 6, pp. 1551–1559.
11. Strain path and microstructure evolution during severe deformation processing of an as-cast hypoeutectic Al–Si alloy / J.M. Garcia-Infanta, A.P. Zhilyaev, F. Carreno, O.A. Ruano, J.Q. Su, S.K. Menon, T.R. McNelley // Ultrafine grained materials. J Mater Sci (2010) 45, pp. 4613–4620.
12. Mechanical Behavior and Microstructural Development of Low-Carbon Steel and Microcomposite Steel Reinforcement Bars Deformed under Quasi-Static and Dynamic Shear Loading / J. Dougherty, E.K. Cerreta, G.T. Gray III, C.P. Trujillo, M.F. Lopez, K.S. Vecchio, and G.J. Kusinski // Ultrafine grained materials. J Mater Sci (2010) 45, pp. 4500–4503.
13. Prevention of Wire Breaks in Gold Fine Wire Drawing and Improvement in Wire Straightening / K.Yoshida, T.Yamashita, A.Tanaka // Bulk Metal Forming-steel research int. 2011, Special Edition.
14. Relationship between microstructure homogeneity and bonding stability of ultrafine gold wire / Seoung-Bum Son, Hyunshul Roh, Suk Hoon Kang // Ultrafine grained materials. J Mater Sci (2010) 45, pp. 236–244.
15. Компьютерное моделирование процесса вытяжки полых стаканчиков из сплава амгб с учетом реальной структуры материала / Бунова Г.З., Воронин С.В., Гречников Ф.В., Юшин В.Д. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 3-1. С. 219–224.
16. Воронин С.В., Юшин В.Д., Бунова Г.З. Компьютерное моделирование процесса прокатки сплава амгб с учетом его анизотропии // Изв. вузов. Авиационная техника. 2008. № 4. С. 72–73.
17. Computer-aided simulation of the amg6 alloy rolling process with allowance for its anisotropy/ Voronin S.V., Yushin V.D., Bunova G.Z. // Russian Aeronautics. 2008. Т. 51. № 4. С. 457–460.
18. Воронин С.В., Бунова Г.З., Юшин В.Д. Компьютерное исследование влияния реальной структуры материалов на характер распространения трещин в хрупких анизотропных телах // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2006. № 4. С. 72–77.

19. A mesoscale cellular automaton model for curvature-driven grain growth / Y.J. Lan, D.Z. Li, Y.Y. Li // *Metallurgical and Materials Transactions B* February 2006, vol. 37, iss. 1, pp. 119–129.
20. Гук С.В., Смирнов О.М., Кавалла Р. Неравномерность деформации компонентов микроструктуры многофазных сталей при оценке предельной формемости листового металла // *Металлург.* 2006. № 5. С. 29–32.
21. Microstructure strain localization during sheet metal hydroforming processes / S. Guk, R. Kawalla // *In steel research international* 76, №12 (2005), pp. 843–851.
22. 3D polycrystalline microstructure reconstruction from FIB generated serial sections for FE analysis/ Y. Bhandari, S. Sarkar, M. Groeber, M.D. Uchic, D.M. Dimiduk, S. Ghosh // *Computational Materials Science* 41 (2007), pp. 222–235.
23. CAD-based reconstruction of 3D polycrystalline alloy microstructures from FIB generated serial sections/ S. Ghosh, Y. Bhandari, M. Groeber // *Computer-Aided Design* 40 (2008), pp. 293–310.
24. Солошенко А.Н. Разработка метода моделирования напряженно-деформированного состояния при обработке давлением структурно-неоднородных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Солошенко Алексей Николаевич. Екатеринбург, 2000. 19 с.
25. Finite Element Simulations of Cold Deformation at the Mesoscale / G.B. Sarma, B. Radhakrishnan, and T. Zacharia // *Comp Mater Sci.*, 12 (2) (1998), pp. 105–123.
26. Multiscale Modeling of Phase Transformations in Steels / M. Militzer, J.J. Hoyt, N. Provatas, J. Rottler, C.W. Sinclair, and H.S. Zurob // *JOM*, 2014 The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 19–26. doi: 10.1007/s11837-014-0919-x
27. Grain-Scale Modeling Approaches for Polycrystalline Aggregates / Igor Simonovski and Leon Cizelj // *Polycrystalline Materials - Theoretical and Practical Aspects*, InTech 2012, pp. 49–74.
28. The complex computer system based on cellular automata method designed to support modelling of laminar cooling processes / Rafal Golab, Lukasz Madej, Maciej Pietrzyk // *Journal of Machine Engineering*, vol. 14, no.1, 2014, pp. 63–73.
29. Simulation of polycrystal deformation with grain and grain boundary effects / H. Lim, M.G. Lee, J.H. Kim, B.L. Adams, R.H. Wagoner // *International Journal of Plasticity* 27 (2011) 1328–1354.
30. Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: Theory, experiments, applications / F. Roters, P. Eisenlohr, L. Hantcherli, D.D. Tjahjanto, T.R. Bieler, D. Raabe // *Acta Materialia* 58 (2010), pp. 1152–1211.
31. Experimental investigation and multiscale modeling of ultra-high-performance concrete panels subject to blast loading / B.D. Ellis, B.P. DiPaolo, D.L. McDowell, M. Zhou // *International Journal of Impact Engineering* 69 (2014), pp. 95–103.
32. Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model / Guillermo Etse, Antonio Caggiano, Sonia Vrech // *Int J Fract* (2012) 178, pp. 131–146. doi: 10.1007/s10704-012-9733-z
33. Conventional and Multiscale Modeling of Microstructure Evolution During Laminar Cooling of DP Steel Strips / Maciej Pietrzyk, Jan Kuziak, Roman Kuziak, Łukasz Madej, Danuta Szeliga, and Rafal Golab // *Metallurgical and materials transactions*, 2014, pp. 17–34.
34. From High Accuracy to High Efficiency in Simulations of Processing of Dual-Phase Steels / L. Rauch, R. Kuziak, and M. Pietrzyk // *Metallurgical and materials transactions volume 45b*, APRIL 2014, pp. 497–506. doi: 10.1007/s11663-013-9926-5
35. Multiscale prediction of mechanical behavior of ferrite–pearlite steel with numerical material testing / I. Watanabe<sup>1</sup>, D. Setoyama, N. Nagasako, N. Iwata and K. Nakanishi // *International journal for numerical methods in engineering* Int. J. Numer. Meth. Engng 2012; 89:pp. 829–845 Published online 12 August 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). doi: 10.1002/nme.3264
36. WOkreślenie parametrów dwustopniowej obróbki cieplnej zapewniającej uzyskanie w strukturze końcowej niskowęglowej stali maksymalnej ilości austenitu szczątkowego decydującego o efekcie TRIP / Wiewiórowska S. // *Hutnik-Wiadomosci-Hutnicze*, 76, 2009, pp. 122–125.
37. On application of shape coefficients to creation of the statistically similar representative element of DP steels/ Rauch Ł., Pernach M., Bzowski K., Pietrzyk M. // *Computer Methods in Materials Science*, 11, 2011, pp. 531–541.
38. Numerical investigation of influence of the martensite volume fraction on DP steels fracture behavior on the basis of digital material representation model / Muszka K., Madej Ł., Graca P., Perzynski K., Sun L., Palmiere E. // *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, pp. 11–17.
39. Influence of the strain rate on the strain-induced transformation of retained austenite to martensite in high strength low alloy TRIP steels / Wei X.C., Li L., Fu R.Y., De Cooman B.C., Wollants P., Zhu X.D., Wang L. //, *Int. Conf. on TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys*, 2002, pp. 367–371.
40. Determination of content of retained austenite in steels with TRIP effect deformed at different strain rates / Wiewiórowska S. // *Steel Research International*, 81, 2010, spec. issue conf. Metal Forming, pp. 262–265.
41. The influence of strain rate and strain intensity on retained austenite content in structure of steel with TRIP Effect/ Wiewiórowska S. // *Solid State Phenomena* 165, 2010, pp. 216–220.
42. Константинов Д.В., Корчунов А.Г. Современные подходы к представлению микроструктуры при моделировании процессов ОМД // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*, 2014. Вып. 20. С. 49–55.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## MULTI-SCALE COMPUTER SIMULATION OF METAL FORMING PROCESSES

**Konstantinov Dmitry Vyacheslavovich** – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

**Korchunov Alexey Georgievich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Affairs, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: [international@magtu.ru](mailto:international@magtu.ru).

**Abstract.** This article presents an overview of the main research directions in the field of computer simulation of the metal microstructure composition during processing. Main advantages and disadvantages of modern methods have been identified, their applications in various fields of metal forming were reviewed, the key development directions and problems were designated. A metal structure reconstruction method was proposed.

**Keywords:** computer simulation, microstructure, metal forming, representative volume.

### References

1. Chukin M.V., Korchunov A.G., Polyakova M.A., Gulin A.V. Analiz metoda nepreryvnogo deformatsionnogo nanostrukturirovaniya provoloki s ispolzovaniem kontsepcii tekhnologicheskogo nasledovaniya. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 4, pp. 61–65.

2. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. *Upravlenie kachestvom produktsii v tekhnologiyakh metiznogo proizvodstva* [Products quality management in metalware production processes]. Moscow: Ruda i Metally, 2012, 164 p.
3. Korchunov A.G., Polyakova M.A., Gulin A.V., Konstantinov D.V. Technological Inherited Connections in Continuous Method of Deformational Nanostructuring. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 555 (2014), pp. 401-405. © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.555.401
4. Kuksa L.V., Evdokimov E.E. Razrabotka konechno-elementnoy modeli i metoda rascheta elementov konstruksii iz strukturno-neodnorodnykh materialov s faktorami kontsentratsii napryazheniuy. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*. [News of higher educational institutions. Construction]. 2002, no. 5, pp. 16-21.
5. Panin V.E., Grinyayev Yu.V., Danilov V.I. *Strukturnye urovni plasticheskoy deformatsii i razrusheniya* [Structural levels of yield strain and fracture]. Novosibirsk: Nauka, 1990, 252 p.
6. Pashkov P.O. *Razryv metallov* [Fracture of metals]. Leningrad: Sudpromgiz, 1960, 243 p.
7. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. *Deformirovanie i prochnost materiala pri slozhnom napryazhennom sostoyanii* [Metal deformation and strength at combined stress]. Kiev: Naukova dumka, 1976, 415 p.
8. Rybalko F.P. Raspreделение neodnorodnostey plasticheskoy deformatsii [Distribution of non-uniformities of plastic deformation]. *Izvestiya vuzov. Fizika* [News of higher educational institutions. Physics]. 1959, no. 1, pp. 6-14.
9. Fridman Ya.B., Zilova T.K., Demina N.I. *Izuchenie plasticheskoy deformatsii i razrusheniya metodom katannykh setok* [Study of plastic deformation and fracture by a rolled grid method]. Moscow: Oborongiz, 1962, 188 p.
10. Chen Jian, Yan Wen, Li Bing, Ma XiaoGuang, Du XinZhi & Fan XinHui Microstructure and texture evolution of cold drawing <110> single crystal copper. *Science China. Technological Sciences*, June 2011, vol.54, no.6, pp. 1551–1559.
11. Garcia-Infanta J.M., Zhilyayev A.P., Carreno F., Ruano O.A., Su J.Q., Menon S.K., McNelley T.R. Strain path and microstructure evolution during severe deformation processing of an as-cast hypoeutectic Al–Si alloy. Ultrafine grained materials. *J Mater Sci* (2010) 45, pp. 4613–4620.
12. Dougherty J., Cerreta E.K., Gray III G.T., Trujillo C.P., Lopez M.F., Vecchio K.S., and Kusinski G.J. Mechanical Behavior and Microstructural Development of Low-Carbon Steel and Microcomposite Steel Reinforcement Bars Deformed under Quasi-Static and Dynamic Shear Loading. Ultrafine grained materials. *J Mater Sci* (2010) 45, pp. 4500–4503.
13. Yoshida K., Yamashita T., Tanaka A. Prevention of Wire Breaks in Gold Fine Wire Drawing and Improvement in Wire Straightening. *Bulk Metal Forming-steel research int.* 2011, Special Edition.
14. Seoung-Bum Son, Hyunshul Roh, Suk Hoon Kang. Relationship between microstructure homogeneity and bonding stability of ultrafine gold wire. Ultrafine grained materials. *J Mater Sci* (2010) 45, pp. 236-244.
15. Bunova G.Z., Voronin S.V., Grechnikov F.V., Yushin V.D. Kompyuternoe modelirovanie protsessa vytyazhki polykh stakanchikov iz splava amg6 s uchetom realnoy struktury materiala. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of the Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences]*. 2009, vol. 11, no. 3-1. pp. 219-224.
16. Voronin S.V., Yushin V.D., Bunova G.Z. Kompyuternoe modelirovanie protsessa prokatki splava amg6 s uchetom ego anizotropii. *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Aviacionnaya texnika* [News of higher educational institutions. Aircraft Engineering]. 2008, no. 4, pp. 72-73.
17. Voronin S.V., Yushin V.D., Bunova G.Z. Computer-aided simulation of the amg6 alloy rolling process with allowance for its anisotropy. *Russian Aeronautics*, 2008, vol. 51, no. 4, pp. 457-460.
18. Voronin S.V., Bunova G.Z., Yushin V.D. Kompyuternoe issledovanie vliyaniya realnoy struktury materialov na kharakter rasprostraneniya treshchin v khрупkikh anizotropnykh telakh [A computer-aided study of how a real structure of materials influences a character of crack propagation in brittle anisotropic bodies]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation]. 2006, no. 4, pp. 72-77.
19. Lan Y.J., Li D.Z., Li Y.Y. A mesoscale cellular automaton model for curvature-driven grain growth. *Metallurgical and Materials Transactions B*, February 2006, vol. 37, iss. 1, pp. 119-129.
20. Guk S.V., Smirnov O.M., Kavalla R. Neravnomernost deformatsii komponentov mikrostruktury mnogofaznykh staley pri otsenke predelnoy formuemosti listovogo metalla [Unhomogeneity of deformation of multiphase steel microstructure components when evaluating limit formability of sheets]. *Metallurg* [Metallurgist]. 2006, no. 5, pp. 29-32.
21. Guk S., Kawalla R. Microstructure strain localization during sheet metal hydroforming processes. *Steel research international* 76, no. 12 (2005), pp. 843-851.
22. Bhandari Y., Sarkar S., Groeber M., Uchic M.D., Dimiduk D.M., Ghosh S. 3D polycrystalline microstructure reconstruction from FIB generated serial sections for FE analysis. *Computational Materials Science* 41 (2007), pp. 222–235.
23. Ghosh S., Bhandari Y., Groeber M. CAD-based reconstruction of 3D polycrystalline alloy microstructures from FIB generated serial sections. *Computer-Aided Design* 40 (2008), pp. 293–310.
24. Soloshenko A.N. *Razrabotka metoda modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri obrabotke davleniem strukturno-neodnorodnykh materialov: avtoreferat dissertatsii po metallurgii, 05.16.05*. [Development of a simulation method for a strain-deformation state when forming structurally inhomogeneous materials: extended abstract Ph.D. dissertation]. Yekaterinburg, 2000, 19 p.
25. Sarma G.B., Radhakrishnan B., and Zacharia T. Finite Element Simulations of Cold Deformation at the Mesoscale. *Comp Mater Sci.* 12 (2) (1998), pp. 105-123.
26. Militzer M., Hoyt J.J., Provatas N., Rottler J., Sinclair C.W., and Zurob H.S. Multiscale Modeling of Phase Transformations in Steels. *JOM*, 2014. The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 19-26. doi: 10.1007/s11837-014-0919-x.
27. Igor Simonovski and Leon Cizelj. Grain-Scale Modeling Approaches for Polycrystalline Aggregates. *Polycrystalline Materials - Theoretical and Practical Aspects, InTech* 2012, pp. 49-74.
28. Rafal Golab, Lukasz Madej, Maciej Pietrzyk. The complex computer system based on cellular automata method designed to support modelling of laminar cooling processes. *Journal of Machine Engineering*, vol. 14, no.1, 2014, pp. 63-73.
29. Lim H., Lee M.G., Kim J.H., Adams B.L., Wagoner R.H. Simulation of polycrystal deformation with grain and grain boundary effects. *International Journal of Plasticity* 27 (2011), pp. 1328–1354.
30. Roters F., Eisenlohr P., Hantcherli L., Tjahjanto D.D., Bieler T.R., Raabe D. Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: Theory, experiments, applications. *Acta Materialia* 58 (2010), pp. 1152–1211.
31. Ellis B.D., DiPaolo B.P., McDowell D.L., Zhou M. Experimental investigation and multiscale modeling of ultra-high-performance concrete panels subject to blast loading. *International Journal of Impact Engineering* 69 (2014), pp. 95-103.
32. Guillermo Etse, Antonio Caggiano, Sonia Vrech. Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model. *Int J Fract* (2012) 178, pp. 131–146. doi: 10.1007/s10704-012-9733-z.
33. Pietrzyk Maciej, Kusiak Jan, Kusiak Roman, Madej Łukasz, Szeliga Danuta, and Golab Rafal. Conventional and Multiscale Modeling of Microstructure Evolution During Laminar Cooling of DP Steel Strips. *Metallurgical and materials transactions*, 2014, pp. 17-34.
34. Rauch L., Kuziak R., and Pietrzyk M. From High Accuracy to High Efficiency in Simulations of Processing of Dual-Phase Steels. *Metallurgical and materials transactions volume 45b*, APRIL 2014, pp. 497-506. doi: 10.1007/s11663-013-9926-5.
35. Watanabel I., Setoyama D., Nagasako N., Iwata N. and Nakanishi K. Multiscale prediction of mechanical behavior of ferrite–pearlite

- steel with numerical material testing. International journal for numerical methods in engineering 2012; 89, pp. 829–845. Published online on 12 August 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). doi: 10.1002/nme.3264
36. Wiewiórska S. Określenie parametrów dwustopniowej obróbki cieplnej zapewniających uzyskanie w strukturze końcowej niskowęglowej stali maksymalnej ilości austenitu szczytkowego decydującego o efekcie TRIP. *Hutnik-Wiadomosci-Hutnicze*, 76, 2009, pp. 122-125.
  37. Rauch Ł., 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*, 11, 2011, pp. 531-541.
  38. Muszka K., Madej Ł., Graca P., Perzynski K., Sun L., Palmiere E. Numerical investigation of influence of the martensite volume fraction on DP steels fracture behavior on the basis of digital material representation model. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, pp. 11-17.
  39. Wei X.C., Li L., Fu R.Y., De Cooman B.C., Wollants P., Zhu X.D., Wang L. Influence of the strain rate on the strain-induced transformation of retained austenite to martensite in high strength low alloy TRIP steels. *Int. Conf. on TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys*, 2002, pp. 367-371.
  40. Wiewiórska S. Determination of content of retained austenite in steels with TRIP effect deformed at different strain rates. *Steel Research International*, 81, 2010, spec. issue conf. Metal Forming, pp. 262-265.
  41. Wiewiórska S. The influence of strain rate and strain intensity on retained austenite content in structure of steel with TRIP Effect. *Solid State Phenomena* 165, 2010, pp. 216-220.
  42. Konstantinov D.V., Korchunov A.G. *Sovremennye podkhody k predstavleniyu mikrostruktury pri modelirovanii protsessov OMD* [Modern approaches to microstructure representation when simulating metal forming processes: international collection of research papers, edited by V.M. Salganik]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, iss. 20, pp. 49-55.

УДК 669.017.1 + 621.78 : 669.14

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 20 В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ \*

Ишимов А.С., Барышников М.П., Чукин М.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

**Аннотация.** Исследовано деформационное поведение стали 20 в условиях одноосного изотермического сжатия с использованием комплекса физического моделирования Gleeble 3500 в диапазоне температур 1000–1200°C и скоростей деформации 0,1–1 с<sup>-1</sup>. На кривых текучести отмечены критические точки и участки, соответствующие основным этапам процесса горячей деформации: динамическое упрочнение, динамический возврат, динамическая рекристаллизация. Проведен сравнительный анализ математических функций, позволяющих описать реологические свойства стали 20. Определены численные значения энергии активации (Q) и параметра Зинера-Холломона (Z). Определены уравнения состояния стали 20.

**Ключевые слова:** динамическая рекристаллизация, Gleeble 3500, горячая деформация, реологические свойства, параметр Зинера-Холломона, сопротивление деформации.

### Введение

В настоящее время моделирование методом конечных элементов (МКЭ) получило большое распространение в качестве математического инструментария для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессах обработки металлов давлением. На сегодняшний день МКЭ реализован в различных программных

комплексах, таких как Symulia Abaqus, Deform2D/3D, QForm, Ansis, Forge 3D и др. [1]. Для корректной постановки задачи, а следовательно, и адекватности получаемых результатов расчетов, в данных программных комплексах, необходимо задать точное описание реологических свойств исследуемого материала [19]. В связи с этим, наличие математической модели, описывающей реологические свойства материала для различных условий деформирования, является актуальной с практической и научной точек зрения задачей.

Условия деформирования оказывают значительное влияние на энергосиловые параметры процесса, микроструктуру и механические свойства готовой продукции. В процессах обработки металлов давлением для оценки напряженно-деформированного состояния, энергосиловых параметров важной характеристикой является сопротивление деформации. На величину сопро-

\* Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства образования и науки Российской Федерации Магнитогорскому государственному техническому университету им. Г. И. Носова по теме «Разработка технологии получения высокопрочных длинномерных профилей из материалов с ультрамелкозернистой структурой в условиях комбинирования процессов интенсивного пластического деформирования» (Задание № 11.1525K от 18 июля 2014 г.).

Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (Договор 02.G25.31.0105).