

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 001.891.573

Лопатина Е.В., Полякова М.А., Воронин К.М.

КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Аннотация. Постановка задачи. Программные комплексы, используемые для моделирования, позволяют решать технические и технологические задачи любой сложности. Перспективными с точки зрения экономических показателей остаются решения задач напряженно-деформированного состояния в условиях технологического цикла с использованием различных методов моделирования. Аналитическая информация, получаемая в ходе моделирования, является основанием для разработки технологических процессов, совершенствования режимов технологических операций, позволяет оперативно корректировать настройки оборудования. **Цель исследования.** Провести сравнительный анализ известных инструментов моделирования процессов обработки металлов давлением. **Используемые методы.** В статье проведен анализ существующих методов моделирования, широко применяемых как в производственной практике, так и для решения научных задач. Особое внимание уделено клеточным автоматам как перспективному методу моделирования, позволяющему получать аналитическую информацию в процессе развития объекта моделирования. **Новизна.** Выявлены достоинства и недостатки существующих инструментов для моделирования процессов обработки металлов давлением. Приведены примеры применения различных методов и инструментов предиктивной аналитики, применяемых для моделирования горячей и холодной прокатки при решении задач напряженно-деформированного состояния обрабатываемой заготовки. **Направления развития.** Программные комплексы, используемые для моделирования процессов обработки металлов давлением, являются неотъемлемой частью работ, проводимых в рамках цифровизации производственных процессов. Использование клеточных автоматов позволяет исследовать поведение объекта с учетом динамики его изменения во времени. Получаемую в результате информацию можно использовать для прогнозирования изменения моделируемого объекта в процессе его обработки, что является неотъемлемой частью управления технологическим процессом.

Ключевые слова: моделирование, клеточные автоматы, обработка металлов давлением, горячая прокатка, холодная прокатка, напряженно-деформированное состояние

Введение

Моделирование является одним из основных инструментов, используемых при создании новых и совершенствовании существующих технологий производства прокатной продукции. Используя различные методы моделирования, можно получать теоретические сведения об энергосиловых параметрах различных процессов обработки металлов давлением, изучать особенности структурообразования в обрабатываемых металлах и сплавах, определять закономерности формирования и формоизменения различных дефектов металлопродукции, что является теоретической базой для разработки направлений развития процессов производства и оптимизации их технологических режимов [1-4].

Существующие методы и программы, используемые для моделирования процессов горячей и холодной прокатки, имеют вполне очевидные ограничения с точки зрения сущности получаемой в ходе моделирования информации, а также точности получаемых результатов. Целью данной работы является проведение сопоставительного анализа применяемых методов компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением (ОМД). При этом особое внимание было уделено тем методам, которые широко применяются для моделирования процессов горячей и холодной прокатки.

Основная часть

В табл. 1 представлены отличительные особенности применяемых методов моделирования процессов ОМД.

В связи с активным развитием цифровых технологий в рамках Индустрии 4.0 в настоящее время наблюдается тенденция по использованию комплексного подхода к моделированию технологических процессов. Данный подход включает несколько основных направлений: сквозное математическое описание всех основных стадий и процессов в соответствии с их логической последовательностью в технологических процессах производства с учетом зависимости свойств материалов от условий их обработки (температура, давление и др.), реализация с помощью математических методов и программных средств возможностей решения как прямых, так и обратных задач моделирования, решение задач оптимизации исследуемого технологического процесса или конструкции по заданной целевой функции, введение в состав программных комплексов элементов экспертных систем для анализа результатов исследований и выбора наиболее оптимальных режимов изучаемых процессов, создание на основе моделирующих программных средств САПР ТП, а также автоматизированного оборудования с гибким программным управлением [6, 7].

Методы моделирования процессов обработки металлов давлением

Метод /программа моделирования	Область применения	Достоинства	Недостатки
Deform-3D Ansys QForm	Моделирование горячей и холодной деформации	Широта охвата решаемых задач. Удобство работы с программным комплексом. Простой, интуитивно понятный интерфейс. Точность получаемых результатов, которая зависит от адекватности модели реальному процессу. Метод конечных элементов, лежащий в основе подавляющего большинства программных комплексов широкого профиля, дает точные результаты, главным образом, при моделировании процессов ОМД с небольшими значениями относительной деформации [5]	Достаточно высокие требования к параметрам компьютерной техники. Значительное время расчета и моделирования одного варианта. Сложность и низкая скорость создания файла входных данных. Длительность обучения пользователей [5]
SimufactForming	Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением и термической обработки	Моделирование всей технологической цепочки от заготовки до готового изделия. Специализированный графический интерфейс для технологов. Высокая точность результатов моделирования. Значительное сокращение времени расчетов с возможностью проведения параллельных вычислений. Моделирование реальной кинематики оборудования любой сложности и типа. Широкие возможности оптимизации [6]	Трудоемкость внесения изменений в систему расчетов. Большой объем документации. Сложность введения исходных данных [7]
Matlab	Решение задач в области технических вычислений	Автоматизация процесса вычисления. Изменения в вычислениях отображаются в результатах расчетов. Удобный интерфейс. Интеграция численных и аналитических математических инструментов. Поддержка интеллектуального автоматического управления единицами физических величин [8]	Высокая стоимость лицензии. Отсутствие развитых средств создания пользовательского интерфейса [8]
WinColdRolling	Расчет энергосиловых, кинематических, температурных и других параметров процессов многопроходной холодной прокатки и дрессировки полос. Оптимизация деформационно-скоростных и теплосиловых режимов прокатки	Оптимизация деформационно-скоростных и температурно-силовых режимов прокатки. Определение минимальной толщины прокатываемой полосы, рациональной толщины горячекатаного подката, параметров настройки непрерывного стана (скорость вращения валков, позиция нажимных устройств и др.) по технологическим параметрам процесса. Решение обратной задачи. Адаптация алгоритмов расчёта энергосиловых и кинематических параметров процесса [9]	В настоящее время разработанная система готова для опытно-промышленного опробования и внедрения в промышленные условия [9]
Клеточные автоматы	Моделирование технологического процесса в динамике с учетом происходящих в технологической системе изменений	Отсутствие ошибок в результате округления расчетов. Возможно решение для любой формы граничных условий. Вычисление параметров производится в локальном месте, эволюция каждой клетки определяется только ею самой и её ближайшими соседями. Связь с физической реальностью: благодаря своей «микроскопической природе» модели клеточных автоматов могут использоваться для явлений, имеющих место в реальных системах, но которые не могут быть получены из макроуравнений, то есть явления, которые «теряются» в результате аппроксимации при переходе от физической модели к непрерывным уравнениям [10]	Анализ явлений, обусловленных дискретной природой клеточных автоматов. Для получения количественных результатов с помощью клеточных автоматов иногда необходимо использовать ансамбль большого числа автоматов [10]

Традиционно для моделирования при решении технологических задач используются специализированные программные комплексы. К универсальным программам моделирования относятся Deform-3D, Ansys, QForm, клеточные автоматы и Simufact.forming. WinColdRolling применяется для холодных процессов обработки металлов давлением. Matlab применяется для моделирования различных устройств и систем с известными выходными данными.

Deform-3D – это специализированный программный комплекс, предназначенный для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением и термообработки. В основе расчетов используется метод конечных элементов. Программный комплекс Deform позволяет моделировать пластическое течение материала для горячих, полугорячих и холодных процессов, как изотермических, так и неизотермических. Теплопередача между объектами и внутри них может быть проанализирована как отдельный процесс или совместно с процессом деформирования по сопряженной схеме. В Deform-3D нет ограничений на количество участвующих в процессе объектов, как деформируемых, так и деформирующих. Результаты могут быть представлены в виде графиков усилия, поля распределения напряжений, деформаций и температуры, также они могут быть представлены в виде таблиц [11].

Ansys представляет программный пакет конечно-элементного анализа, решающий задачи в различных областях инженерной деятельности (расчет прочности конструкций, расчеты в области термодинамики, механики жидкостей и газов, электромагнетизма и др.), включая связанные междисциплинарные задачи (термопрочность, магнитоупругость и т.п.). Ansys состоит из различных функциональных приложений. Функциональность Ansys Mechanical характеризуется большим разнообразием связей от линейных неразрывных контактов, слияний узлов на сеточном уровне и шарниров до нелинейных контактных взаимодействий, автоматического определения и настройки контактов. Данный комплекс моделирует поведение объектов с учетом механических и тепловых свойств материалов (в том числе упругие, вязкопластичные, ортотропные, с упрочнением и разупрочнением, пористые, хрупкие (стекло, керамика) и др.). При этом имеются следующие расчетные возможности: определение напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции, определение НДС с учетом нелинейных моделей материалов, моделирование процессов формообразования и формоизменения, определение НДС конструкций, возникающего от тепловых деформаций и т.д. [12].

Программное обеспечение QForm позволяет моделировать самые разнообразные холодные и горячие процессы ОМД: штамповку, свободную ковку, выдавливание, продольную прокатку, поперечно-клиновую прокатку, винтовую прокатку, экструзию профилей, процессы гибки, раскатку колец и колес,

ротационную вытяжку, штамповку высоким давлением, листовую штамповку, орбитальную штамповку, штамповку спеченных порошков, совместную деформацию нескольких заготовок из разных материалов и другие специальные процессы. Дополнительно возможно моделирование фазовых превращений при термообработке, решение упругопластической задачи при нагреве и охлаждении, расчет микроструктуры при деформации [13].

Simufact.forming является полнофункциональным комплексным решением для моделирования широкого спектра технологий обработки металлов давлением. Simufact.forming позволяет получить реалистичное представление технологических процессов с полноценной 3D-визуализацией всех инструментов и деталей. Высококачественное моделирование в Simufact.forming основывается на использовании лидирующих программных пакетов компании MSC Software: конечно-элементного решателя для нелинейных задач Marc и конечно-объемного решателя для нелинейных задач Dytran. Simufact.forming предлагает широкий набор инструментов для виртуального проектирования и отработки реальных технологических процессов. Используя Simufact.forming, можно моделировать как отдельные стадии технологического процесса, так и всю технологическую цепочку – от заготовки до готового изделия. Данный программный комплекс характеризуется модульной концепцией, все инструменты поделены на приложения. Приложения следует устанавливать отдельно в зависимости от поставленной задачи [14].

Программный комплекс Matlab представляет собой среду и язык для отображения технических расчетов. В данном программном комплексе нет рабочих инструментов и условий для запуска технологического процесса. Он отличается большей универсальностью по сравнению с другими программными комплексами. Matlab – это одновременно язык инженерных расчетов, графические приложения (приложения с графическим интерфейсом) и средства разработки программного обеспечения [15].

WinColdRolling используется в основном для моделирования процессов холодной прокатки и дрессировки полос из сталей и сплавов. Основное функциональное назначение данного программного комплекса заключается в расчетах энергосиловых, кинематических, температурных и других параметров процессов многопроходной холодной прокатки и дрессировки полос, а также для оптимизации деформационно-скоростных и теплосиловых режимов прокатки [16].

Особое внимание следует уделить интеллектуально-программному комплексу типа «клеточные автоматы». Интересно, что определение клеточного автомата является весьма общим, и в класс клеточных автоматов могут быть включены и объекты, изучаемые в других разделах. В соответствии с [17] под клеточными автоматами понимаются сети элементов, меняющих свое состояние в последовательные дис-

кретные моменты времени по определенному закону в зависимости от того, каким было состояние рассматриваемого элемента и его соседей в предыдущий дискретный момент времени. Для работы клеточного автомата требуется задание начального состояния всех ячеек и правил перехода ячеек из одного состояния в другое. Для каждой итерации (переход в другое состояние) используется правило перехода и состояния соседних ячеек, таким образом определяется новое состояние каждой ячейки в сетки. Реализовать моделирование технологического процесса с помощью клеточного автомата можно на ОС Windows (Visual basic), в программных комплексах MATLAB & Simulink, SIMULIA Abaqus и др. Клеточный автомат позволяет моделировать любой технологический процесс с минимальной погрешностью результатов. Методы клеточных автоматов также нашли широкое применение для решения задачи по моделированию распределения напряжений и деформаций в металлах и сплавах. Данные подходы основаны на представлении моделируемой среды в виде ансамбля взаимодействующих активных элементов (ячеек) определённого размера. Метод клеточных автоматов позволяет производить расчёт быстропротекающих динамических процессов, таких как распределение энергии в деформируемом твёрдом теле, не решая сложных дифференциальных уравнений, использование которых зачастую является весьма затруднительным. В целом клеточные автоматы можно рассматривать как машину с синхронным параллельным вычислением. Программно-интеллектуальный комплекс может состоять из целого ряда автоматов, включая одномерные, трёхмерные, с большим радиусом окрестностей, с треугольными и шестиугольными ячейками. Также имеется возможность задавать даже такие правила, в которых соседние ячейки никак не влияют на работу автомата, зато влияют находящиеся на некотором расстоянии (все или некоторые). Все итерации и запуск клеточного автомата происходит через прописанные в программе правила. Основным преимуществом клеточных автоматов является универсальность и простота. Условия вычислений можно корректировать в процессе работы программного комплекса без потери данных и дополнительных изменений в сетке вычислений.

Актуальность применения клеточных автоматов для решения задач напряженно-деформированного состояния представлена в работах [18-20]. В работе [18] описаны результаты проведенных вычислительных экспериментов для расчета сжимающих и растягивающих напряжений в движущемся стальном слитке марки 40X. Компьютерная модель задачи основана на совместном применении теории клеточных автоматов и конечно-разностных методов. Следует отметить, что конечно-разностная аппроксимация дифференциальных уравнений хорошо сочетается с парадигмой клеточного автомата. Представленная математическая модель, основанная на совместном исполь-

зовании уравнений теории упругости и нестационарной теплопроводности может быть положена в основу программных средств компьютерного моделирования термонапряженного состояния слитков при изменении граничных условий по температуре. Результаты вычислительных экспериментов показывают возможности для анализа различных режимов нагрева слитков в шаговых печах [18].

Использование дискретно-континуального метода возбудимых клеточных автоматов для моделирования напряженно-деформированного состояния в вершинах трещин и надрезов с учетом кривизны кристаллической решетки показано в работе [19]. Предлагаемая математическая модель деформации нагруженного твердого тела основана на положении, что процесс деформации является следствием перераспределения энергии между различными структурными элементами твердого тела. Разработаны алгоритмы моделирования переноса фронта неупругой деформации в зоне кривизны кристаллической решетки на базе нелинейного дискретно-континуального метода возбудимых клеточных автоматов. Построен тензор завихренности структурных трансформаций, которые возникают при последовательном развитии пластической дисторсии вдоль вершины трещины в процессе ее распространения. Показана возможность развития структурной турбулентности на фрактограммах вязкого разрушения субмикроструктурных материалов. Разработанный метод имеет широкие перспективы в моделировании нелинейных волновых процессов в полосах локализованной деформации, где возникает микропористость и распространяется трещина продольного сдвига, описании функциональных свойств наноструктурных материалов и прогнозировании механического поведения твердых тел [19].

В работе [20] описан обобщающий подход моделирования процессов ОМД с помощью клеточных автоматов. Представлены параметры технологического процесса в виде материальных точек в системе автоматов. В вычислительном плане клеточно-автоматная модель работает на порядок быстрее классических вычислительных методов (метода конечных элементов, разностных моделей), которые требуют последовательности итераций. Причем на каждой итерации происходит решение системы линейных уравнений большого порядка. Таким образом, клеточно-автоматная модель открывает широкие перспективы для разработки эффективных программ расчета НДС заготовки в процессе обработки давлением [20].

Заключение

Сравнительный анализ методов моделирования процессов ОМД позволил оценить возможности их применения для решения конкретных технологических и технических задач. Одним из перспективных методов моделирования является использование метода клеточных автоматов, который в настоящее время еще не находит широкого применения. Однако

возможность получения результатов моделирования процессов обработки «в динамике», то есть в каждый отдельный момент времени с учетом истории состояния объекта, выгодно отличает клеточные автоматы по сравнению с конечно-элементными методами моделирования. Клеточные автоматы позволяют решать задачи различной сложности, что, несомненно, соответствует основным подходам цифровизации технологических процессов производства металлоизделий.

Список литературы

1. Рудской А.И., Колбасников Н.Г. Физическое и математическое моделирование формирования структуры и свойств сталей при горячей прокатке. Разработка современных технологий горячей прокатки сталей с гарантируемым уровнем механических свойств // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина», [г. Екатеринбург, 29 октября - 1 ноября 2012 г.]. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. С. 331-344.
2. Коренко М.Г. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке в разгонных калибрах // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. №4/7. С. 36-40.
3. Стоякин О.А. Исследование формирования клиновидности и серповидности горячекатаных стальных полос для повышения устойчивости процесса прокатки: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. М., 2019. 141 с.
4. Тарасов П.А. Исследование и моделирование энергосиловых параметров процесса горячей прокатки тонких полос для повышения эффективности работы широкополосных станов: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05: Череповец, 2009. 161 с.
5. Тишук Л.И. Разработка методики проектирования процессов пластического формоизменения металлических плоских заготовок на основе компьютерного и физического моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Воронеж, 2018. 169 с.
6. URL: <https://mcssoftware.ru/products/simufact>
7. Яблочников Е.И., Пирогов А.В., Андреев Ю.С. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении: учеб. пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 92 с.
8. Колкер А.Б., Ливенец Д.А., Кошелева А.И. Обоснование выбора программного обеспечения для робототехники // Автоматика и программная инженерия. 2012. №1. С.51-64.
9. Приходько И.Ю., Воробей С.А., Шатохин С.Е. Моделирование процессов эффективного охлаждения валков листопрокатных станов // Сталь. 2005. №1 С.72-77.
10. Шакаева М.С. Простейшие клеточные автоматы в математическом моделировании процессов.: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.16. М., 1995. 127 с.
11. URL:<https://sapr.ru/article/7481>
12. URL: <https://www.cadfem-cis.ru/>
13. URL: <https://www.qform3d.ru/processes>
14. URL: http://www.mcssoftware.ru/docs/products/simufact/imufact_forming_rus.pdf.
15. URL: <https://exponenta.ru/matlab>
16. URL: http://metaltehnomash.com.ua/software/WinColdRolling/WinColdRolling_ru.html].
17. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М: Наука, 1974. 432 с.
18. Чичко А. Н., Бороздин А. С. Трехмерное моделирование напряженного состояния движущегося слитка при изменении граничных условий по температуре // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2005. № 4. С.61-67.
19. Эффекты пластической дилатации в зоне кризиса кристаллической решетки в вершине трещины / Панин В.Е., Моисеенко Д.Д., Максимов П.В., Панин С.В. // Физическая мезомеханика. 2017. № 3. С.40-50.
20. Исследование возможности анализа напряженно-деформированного состояния на клеточных автоматах / Рубин Г.Ш., Шишов А.А., Чукин М.В., Гун Г.С. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2012. № 39. С.114-117.

Сведения об авторах

Лопатина Екатерина Витальевна – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: lopatina.yekaterina2016@yandex.ru

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Воронин Константин Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры УиИС ИСАиИ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: voronin.km@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CELLULAR AUTOMATA AS A PROMISING METHOD FOR MODELING METALWORKING PROCESSES BY PRESSURE

Lopatina Ekaterina V. – postgraduate student of the Department of Materials Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lopatina.yekaterina2016@yandex.ru

Polyakova Marina A. – Dr. Sci. (Eng.), associate professor, professor of Department of Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Voronin Konstantin M. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Urban Studies and Engineering Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: voronin.km@mail.ru

Abstract. *Problem statement:* The software complexes used for modeling allow solving technical and technological problems of any complexity. Solutions of the problems of the stress-strain state in the conditions of the technological cycle using various modeling methods remain promising from the point of view of economic indicators for the near future. The analytical information obtained during the simulation is the basis for the development of technological processes, improving the modes of technological operations, allows you to quickly adjust the settings of equipment. *The purpose of the study.* To conduct a comparative analysis of well-known modeling tools for metalworking processes by pressure. *The methods used.* The article analyzes the existing modeling methods that are widely used both in production practice and for solving scientific problems. Special attention is paid to cellular automata as a promising modeling method that allows obtaining analytical information during the development of the modeling object. *Novelty.* The advantages and disadvantages of existing tools for modeling the processes of metal working by pressure are revealed. Examples of the application of various methods and predictive analytics tools used to simulate hot and cold rolling in solving problems of the stress-strain state of the workpiece are given. *Directions of development.* Software complexes used for modeling metalworking processes by pressure are an integral part of the work carried out as part of the digitalization of production processes. The use of cellular automata makes it possible to study the behavior of an object taking into account the dynamics of its change over time. The resulting information can be used to predict changes in the simulated object during its processing, which is an integral part of process control.

Keywords: modeling, cellular automata, metal processing by pressure, hot rolling, cold rolling, stress-strain state.

Ссылка на статью:

Лопатина Е.В., Полякова М.А., Воронин К.М. Клеточные автоматы как перспективный метод моделирования процессов обработки металлов давлением // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 37-42.

Lopatina E.V., Polyakova M.A., Voronin K.M. Cellular automata as a promising method for modeling metalworking processes by pressure. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 37-42.