

УДК 621:519.6

Кривцов В.С., Нарыжный А.Г.

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Украина, г. Харьков

МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Анотація

Надано огляд зарубіжних публікацій в галузі дослідження та оптимізації суттєво механічних технологічних процесів і відповідних технологічних систем. Метод дослідження — комп'ютерне моделювання з використанням числових вирішень механіки суцільних середовищ. Окреслена область продуктивного використання моделювання. Моделювання є заміником або додатком до експериментального метода. Відзначена структурна складність досліджених технологічних систем, складність та різноманітність взаємодій між елементами. Моделювання найбільше ефективно при розробці нових техпроцесів, використанні матеріалів з незвичайними властивостями, дослідження накопичення змін деталі за умов використання технологічних ланцюжків.

Abstract

Is presented review of foreign publications in the field of studies and optimizations of the technological processes of the mechanical nature and corresponding technological systems. The computer simulation based on the numerical solutions of continuums mechanics is the method of the study. The application domain of the productive using of simulation is characterized. The simulation is a substitute or additional method of the study vs experimental method. It is noted increased structured complexity and variety of element interactions of the under investigation technological systems. Simulation of new technological processes, use of material with new unusual technological characteristics, investigation of accumulations of the change the detail when is used technological chain are particularly effectively.

Многие технологические процессы (ТП) протекают за счет механического движения элементов соответствующих технологических систем (ТС). Для рационального проектирования, использования и оптимизации ТС и протекающих в них ТП необходимы систематические исследования закономерностей существенных механических и связанных с ними процессов иной природы.

В работе [1] отмечено, что необходимые знания приобретаются обычно в опыте, формулируются в

виде эмпирических правил и проверяются в технологических экспериментах. Эмпирический характер знаний ограничивает их применение, в особенности, при разработке новых ТП и ТС.

Для исследования ТП и ТС все чаще используется механико-математическое моделирование, основанное на численных решениях задач механики сплошных сред и обладающее наибольшей теоретической широтой и общностью.

Некоторые ТП, например ковка, прокатка, высадка, экструзия, волочение, штамповка листового металла и др. сопровождаются большими деформациями (текучестью), которые связаны со значительными движениями границ и нелинейны. Источниками нелинейности подобных ТП являются также материальные свойства элементов ТС и контактные взаимодействия.

Отмеченные особенности ТС представляют существенные трудности в применении традиционного уже лагранжева метода конечных элементов (МКЭ), что стало причиной поиска и разработки ряда новых подходов и методов решения задач в направлении прикладной механики FSI (Fluid-Structure Interaction). Эти новые подходы и методы нашли свое воплощение в различных образцах программного обеспечения (ПО), которые получили широкое распространение и разнообразное применение.

Целью статьи является определение предметной области, подходов и методов исследований закономерностей и особенностей ТС и ТП с использованием моделирования. В основном рассмотрены работы, опубликованные в последние 10 лет и выполненные с применением ПО LS-DYNA.

Основная масса работ посвящена решению вопросов теории обработки металлов давлением, меньше — теории обработки резанием, сборочным операциям, металлургии и прочим ТП. Часто в одной работе рассматриваются вопросы, относящиеся к различным ТП, что характерно для моделирования, поскольку различные ТС являются частными реализациями общего для моделирования понятия «механическая система». Применение универсальных для механических систем методов моделирования еще больше нивелирует различия ТС.

Традиционная статическая листовая штамповка с использованием жесткого инструмента раньше прочих ТП стала предметом моделирования, здесь же моделирование наиболее продвинулось, создав при-

меры для других направлений. В статье [2] обсуждается проблема глубокой вытяжки при штамповке крупных деталей (автомобильная крыша или дверь), которая проходит с малым сопротивлением, что создает малую деформацию в средней части детали и плохо сказывается на сопротивлении конструкции, например, при краш-тестах. Посредством моделирования показано, что с помощью технологии активного гидро-механического деформирования (АГМД) может быть достигнут значительный уровень пластической деформации, необходимой для устойчивости детали. Поставлен вопрос об изучении пружинения в АГМД путем моделирования. В статьях [3, 4] рассмотрено моделирование пружинения детали, зависимость результатов моделирования от различных параметров. Показано значительное влияние трения и размеров КЭ. Работа [5] описывает специальный пре-постпроцессор, облегчающий подготовку специфических моделей и анализ результатов моделирования.

Воздействие на заготовку с помощью технологической жидкости (гидроформование) обладает рядом особенностей, в том числе, и в методиках исследования. В работе [6] отмечено, что алюминиевые сплавы применяются в автомобилестроении ввиду малого веса и высокой коррозионной стойкости. Гидроформование алюминиевых труб предложено недавно, поэтому отсутствуют достаточные знания об особенностях этого ТП. Описаны этапы техпроцесса (технологическая цепочка). Отмечено хорошее соответствие моделирования результатам эксперимента. В статье [7] моделируется ТП горячего гидроформования алюминиевых труб. В работе [8] проведены анализ чувствительности и оптимизация процесса гидроформования по методу Taguchi. Моделирование используется для получения необходимой информации о параметрах процесса деформирования вместо эксперимента.

В статье [9] описан сравнительно новый ТП-последовательное ЧПУ деформирование (Incremental Sheet Forming-ISF), имеющий преимущество при изготовлении малых серий и прототипов изделий. В этом ТП заготовка последовательно и многократно деформируется простым инструментом в комбинации с простым прижимом. Удешевление производства обеспечивается за счет дешевизны простого инструмента и использования унифицированного оборудования. Однако при попытке оптимизации управления процессом по критерию точности на основе эмпирического подхода встречаются значительные трудности из-за непредсказуемого проявления накопленных на предыдущих этапах остаточных напряжений и деформаций. Поэтому используется многократное последовательное моделирование для анализа изменений механических состояний детали и прогноза результата всей последовательности технологических действий.

В автомобилестроении нашел применение ТП деформирования тонколистовых заготовок гибкой в многовалковом стане. Работа [10] освещает моделирование холодного деформирования панелей открытого профиля в многовалковом стане.

В исследовании [11], во-первых, моделируется многопереходный ТП деформирования профиля автомобильного бампера из высокопрочной стали. Последовательность формовочных операций: а) деформирование в роликовом стане (включая формование развертки-заготовки); б) локальный отжиг; в) образование начальной складки и сплющивание концов ранее прокатанных частей. Во-вторых, моделируется соударение бампера с препятствием с учетом остаточных технологических напряжений и деформаций, которые были сохранены в электронной форме при первичном моделировании. Описано применение результатов моделирования для разработки прототипа бампера.

Моделирование распространяется на исследование многопереходных процессов, протекающих с накоплением остаточных деформаций и напряжений, как, например, в предыдущем случае. Статья [12] знакомит с ПО JSTAMP-Works, созданным для моделирования многопереходных ТП на основе вычислительных ядер ПО LS-DYNA и JON/NIKE и имеющим интерфейс с ПО LS-DYNA для моделирования краш-тестов с учетом технологических напряжений. Приведены примеры моделирования изготовления и последующих тестов деталей типа автомобильных дверей и труб. Отмечено хорошее соответствие с результатами экспериментов.

Моделирование применяется не только для исследования деформирования деталей, но и для проектирования оборудования и инструмента, обеспечивающих штамповку, с учетом пружинения заготовки, упругости материала инструмента, а также отсутствия складкообразования, порывов и других видов брака детали. В работе [13] отмечается, что в течение долгого времени проектирование оборудования и инструментов для обработки металлов давлением базировалось, в основном, на экспериментальных знаниях, полученных в длительных и затратных исследованиях, изобилующих пробами и ошибками. Сегодня уже на ранних этапах проектирования моделирование процессов деформирования нашло постоянное применение. В статьях [14, 15] утверждается, что моделирование деформирования тонколистовых деталей достигло приемлемого уровня точности. Возможно предсказать упрочнение, утонение и потребные усилия для листовой штамповки металла, а также дефекты, например, пружинение, складкообразование, порывы и задиры в связи с особенностями инструмента и оснастки. Моделирование деформирования может рассматриваться как завершающий этап в разработке инструмента, обеспечивающего заданную геометрию и

свойства детали. В работе [13] отмечается, что для типичных тонкостенных деталей в процессе их изготовления первым процессом деформирования является процесс глубокой вытяжки. Моделирование используется для оптимизации первой операции деформирования. До 30 раз проводят моделирование с изменением формы и способа движения инструмента для того, чтобы избежать двух видов повреждений: разрывов и гофров. В исключительных случаях исследуется распределение утонений.

В статье [16] подчеркнута сложность процесса проектирования (техпроцесса, инструмента и оснастки). Начинается все с грубого анализа, результаты которого используются при более точном анализе и т.д. Описывается формальный кластерный подход к проектированию, в котором моделирование используется для получения количественной информации о механическом состоянии элементов ТС вместо эксперимента. Приведен пример моделирования.

В работах [14, 17] представлены методология и методика практической оптимизации (технологии) применительно к листовой штамповке в автомобилестроении. Методика представляет собой автоматизированный процесс последовательного изменения геометрии штамповой оснастки для получения качественной (свободной от дефектов) детали. Рассматриваются дефекты двух видов - материальные (разрывы и складки) и геометрические (пружинение). Материальные дефекты являются неустрашимым браком, геометрические - делают невозможной последующую сборку. Применение методики иллюстрируется на примере. Применяется специальное ПО Hupermorph [14] и VRForm [17].

В статьях [18–20] описаны методики определения формы штамповой оснастки для получения детали с учетом пружинения, в последнем случае используется ПО eta/DYNAFORM, разработанное на основе вычислительного ядра ПО LS-DYNA.

В большинстве исследований, в том числе в вышеупомянутых, оснастка и инструмент считаются жесткими и недеформируемыми. В работе [21] исследуется влияние упругости инструмента на деформирование детали.

Технология вынуждена использовать все новые материалы с новыми технологическими возможностями и свойствами, для продуктивного использования которых необходимо приспособлять традиционные ТП или применять новые. И в первом, и во втором случаях необходимы исследования для рационального применения ТП.

Ради уменьшения массы автомобиля все чаще в автомобилестроении, как раньше в авиастроении, применяются алюминиевые и титановые сплавы, а также высокопрочные стали.

В статье [22] отмечается, что алюминиевые сплавы, применяемые в конструкции автомобиля имеют пониженную деформируемость в сравнении с тради-

ционными сталями при обычных скоростях деформирования, в связи с чем достижимые формы деталей более ограничены. Авторы исследуют действие взрыва химического заряда в воздухе и в воде для улучшения деформируемости сталей. Моделирование деформирования пластинки в ПО LS-DYNA дает результаты, хорошо согласующиеся с результатами экспериментов. Работа [23] посвящена проблеме специфической неустойчивости алюминиевых сплавов при традиционной штамповке тонколистовых металлов, а также соответствующим специальным материальным моделям в ПО LS-DYNA. Автор статьи [24], описывая ситуацию в Великобритании, отмечает как достижение введенное в практику неявное моделирование пружинения детали и указывает актуальность разработки адекватных материальных моделей высокопрочных сталей и некоторых алюминиевых сплавов, исследования влияния трения, а также процедуры оптимизации для эффективного проектирования штамповой оснастки.

Титановые сплавы обладают рядом достоинств, но одновременно - высокой стоимостью. В статье [25] описано моделирование глубокой вытяжки титановых сплавов с использованием материальной модели Барлата. В данном случае моделирование применяется для снижения стоимости подготовки производства детали, а также для уточнения параметров материальной модели.

Предметами статьи [26] являются особенности деформирования высокопрочных сталей и отражение этих особенностей при моделировании операций штамповки. Работа [19] посвящена методике проектирования инструмента для штамповки высокопрочных сталей. Моделирование штамповки выполнено с помощью ПО eta/DYNAFORM.

Статья [27] посвящена явлению сверхпластичности, которое проявляется у некоторых сплавов (например, алюминиевых сплавов) и керамик, при этом удлинение достигает 100% и более без разрушения (для алюминиевой бронзы получено удлинение более 5000%). Условия проявления сверхпластичности: мелкозернистая (менее 1 мкм) структура, температура около половины температуры плавления, процесс деформирования должен протекать при скоростях деформаций 10⁻⁴...10⁻² 1/с. Сверхпластическое деформирование становится обычным в самолетостроении и в других отраслях промышленности. Сверхпластичность используется при формообразовании деталей, которые не могут быть получены по техническим или экономическим причинам с использованием материалов с обычной пластичностью. При эмпирическом выборе технологических параметров затруднительно обеспечить необходимые скорости деформаций для проявления сверхпластического деформирования, где и когда это необходимо. Для разработки программы нагружения, обеспечивающей необходимые скорости дефор-



маций, используется многократное вариантное моделирование. Приведены примеры моделирования и сравнение с результатами экспериментов.

Механические процессы чувствительны к условиям, в которых осуществляется ТП, прежде всего повышенным температурам или скорости деформирования, как, например, в предыдущем случае. Работа [28] посвящена моделированию пластического деформирования деталей, материал которых чувствителен к виду напряженного состояния и скорости деформирования. В докладе [29] рассмотрено моделирование свободнойковки и экструзии с применением метода EFG (Element Free Galerkin) и учетом температурной зависимости свойств материалов, а также теплообмена.

Технологические напряжения и деформации могут существенно изменять поведение деталей в процессе эксплуатации, а также при аварийных ситуациях, когда от них требуется гарантированная повышенная надежность. В статье [30] описано моделирование автомобильных крэш-тестов с учетом технологических напряжений деталей из алюминиевых сплавов, найденных при моделировании ТП гидроформования и последующего пружинения. Подобное моделирование для стальных корпусных деталей, деформированных жесткими инструментами, описано в работах [31, 32].

Наблюдается постоянный поиск средств, отражающих в моделях новые или особые свойства ТП и ТС, а также обеспечивающих повышение точности модельных решений. В ПО LS-DYNA [33] использован новый тип аппроксимационных функций NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), обеспечивающих более гладкие формы оболочек при штамповке. В работе [34] рассмотрен новый тип контактных условий, повышающий точность моделирования по неявному методу операций штамповки.

Большое внимание уделяется не только разнообразию моделей и точности решений, но и расширению возможностей интерпретации и использования полученных результатов для анализа процессов. В работе [35] обсуждается поход к планированию и проведению моделирования подготовки производства и изготовления автомобиля, основанный на трех положениях. Во-первых, конструктивно-технологическая типизация деталей, во-вторых, использование быстрых программных средств разработки оснастки, инструмента и моделирования формообразования, в-третьих, использование ПО для управления оборудованием, исполняющим формообразование, сборку и окраску. Используется понятие «модели цепочки процессов». В рамках такого подхода моделирование процессов формообразования представляет лишь один из множества различных связанных моделирующих процессов.

Статья [36] посвящена учету влияния различных факторов, определяющих форму инструмен-

та при штамповке, на процесс и результаты моделирования штамповки.

Для анализа процесса деформирования тонколистовых деталей, в частности прогноза образования порывов и складок, широко применяются FLD-диаграммы (Forming Limit Diagram). В работе [37] рассмотрено влияние характера упрочнения материала детали на вид и содержание FLD-диаграммы. В работе [38] подчеркивается нелинейный характер FLD-диаграмм, что делает затруднительным анализ деформируемости некоторых высокопрочных материалов, и обсуждается другой поход анализа предельных состояний, основанный на анализе напряжений, а не деформаций.

Среди ТП объемного деформирования наибольшее внимание уделено ковке, высадке, экструзии. В работах [39- 41] обсуждаются адаптивные схемы дискретизации по пространственным координатам EFG, основанные на локальном максимуме энтропии для моделированияковки, высадки и экструзии металлов в лагранжевой, эйлеровой, полу-эйлеровой системах отсчета, которые повышают точность и адекватность модельных решений. В работе [29] рассмотрено влияние теплообмена и температурных деформаций на характер деформирования при моделировании.

В статье [42] рассмотрен адаптивный бессеточный метод моделирования для тел с большими изменениями топологии в приложении к технологиям объемного формообразования. Интерактивная адаптация рассматривается как мера борьбы с дисторсией сетки. Рассмотрены примеры моделированияковки ступицы колеса, поперечного выдавливания, резания металла с образованием стружки.

В диссертационной работе [43] развивается поход ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) для моделирования объемного деформирования металлов. Рассмотрены примеры: изгиб, экструзия, прокатка в валках. Разработана двумерная программа ALEFE.

Работа [44] представляет развитие ALE для анализа движения сред со свободной поверхностью. Подход использован для моделирования экструзии с учетом волнистости поверхности экструдата.

Предмет исследования [45] — «вспухание» полимерного экструдата после выхода из фильеры. С точки зрения механики сплошных сред это задача о течении ньютоновских и вязкоупругих сред со свободной поверхностью. Исследование проведено с целью оптимизации параметров конструкции (фильеры) и технологических параметров ТП. Использован подход ALE. Отмечено хорошее соответствие результатам экспериментов и другим расчетам.

В статье [46] описано моделирование экструзии листового металла (поперечная высадка из листового материала) с применением подхода ALE. В отличие от предыдущих работ использовано ПО MSC/MARC.

Не иссякает интерес к применению и исследованию импульсных методов обработки металлов, обладающих особыми свойствами воздействия, отвечающими особым свойствам деформирования ряда материалов. В работах [22, 47] развивается моделирование штамповки алюминиевых сплавов подводным и воздушным взрывом химического заряда. Формулируется задача изучения процесса деформирования алюминиевого сплава взрывом в воде. Описана модель, параметры модели. Обсуждается история поля давления, деформирование. Результаты моделирования в ПО LS-DYNA хорошо соответствуют экспериментальным данным. В работе [48] описано моделирование подводного взрыва химического заряда, проведенного для изучения сопротивления конструкции корабля. Учтено кавитационное схлопывание газового пузыря. Отмечено хорошее соответствие результатам эксперимента. В статье [49] описано моделирование механического действия высокоэнергетических материалов (детонирующих взрывных, горючих, пиротехнических систем и т.п.) в пакете LS-DYNA. Приведены примеры. Последние две работы содержательно близки проблеме исследования ТП штамповки взрывом.

В работах [50–53] представлены новые возможности ПО LS-DYNA, предназначенные для моделирования электромагнитной штамповки металлов. Электромагнитные поля моделируются конечными элементами для индуктора и граничными элементами для окружающего пространства. Рассмотрены примеры- электромагнитная штамповка и электромагнитная пушка. Проведено сравнение с данными экспериментов, отмечено хорошее соответствие. Статья [54] посвящена описанию ПО ALEGRA, имеющего междисциплинарный (multiphysics) характер и основанному на подходе ALE. Рассмотрены примеры: магнитное импульсное сжатие (по сути- деформирование детали), моделирование разрушения керамики, действие электромагнитной пушки.

Моделирование обладает плодотворными возможностями при исследовании процессов обработки металлов резанием. Автор статьи [55] констатирует, что при обработке на станках выбор параметров процесса резания проводится на основе опыта или экспериментов. Этот подход может привести к высокой стоимости и далеко не лучшим решениям. Несмотря на некоторые затруднения, например, определения параметров моделей материалов, МКЭ (метод конечных элементов) моделирование процесса образования стружки может рассматриваться как удовлетворительный подход для изучения процессов резания, позволяющий понизить стоимость исследования. Он дает информацию о некоторых трудноизмеримых (в эксперименте) параметрах, таких как температура, энергия, напряжения и таким образом обогащает теорию резания. В работе применяется подход ALE для решения связанной

термомеханической задачи FSI, используется материальная модель термовязкопластичности, учтено трение по Кулону. Задача о плоском напряженном состоянии решается в двумерной постановке. Используется ПО ABAQUS.

В статье [56] описано моделирование обработки точением и фрезерованием. Использована КЭ лагранжева модель реза и детали, учтено скоростное упрочнение материала детали в форме Cowper-Symonds. По тому же методу в [57] моделируется точение технической меди с применением различных моделей материала. Исследуются зависимости напряжений, деформаций, усилий резания. Сравнение с результатами эксперимента хорошее.

Работа [42] посвящена моделированию резания с образованием стружки с использованием бессеточного лагранжева метода EFG, для той же цели в [58, 59] используется метод SPH (Smooth Particle Hydrodynamics). Получено хорошее соответствие в результатами эксперимента. В отличие от предыдущих работ в [60] моделирование высокоскоростного резания проводится не в 3-х мерной, а в 2-х мерной постановке SPH, что позволяет экономить ресурсы компьютера. Учитывается износ кромки реза.

Статья [61] посвящена трехмерному моделированию в рамках подхода ALE токарного точения с использованием твердосплавной пластинки и образованием стружки. Основное внимание уделено влиянию формы галтели на передней кромке. Учтено трение. Использована упруго-пластическая модель материала Джонсона-Кука со скоростным упрочнением и температурным влиянием для стали AISI 52100. Анализируются нагрузки на инструмент, температуры и напряжения в пластинке. Отмечено хорошее соответствие экспериментальным данным.

Сборка изделий с использованием сварки, клепки и склеивания являются прогрессивными ТП, но плохо поддающимися исследованию обычными методами. Ряд работ посвящен применению и раскрывают возможности моделирования как метода исследования таких ТП.

В работах [62, 63] описана методика прогноза образования остаточных термомеханических деформаций при дуговой сварке швом с учетом последовательности наложения швов, основанная на моделировании. Действие швов выражается приложением фиктивных сжимающих усилий. Приведены примеры моделирования полей деформаций вследствие сварки элементов замкнутого профиля- труб, обечаек и др. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными. В статье [64] описано моделирование деформирования и разрушения деталей, соединенных точечной электрической сваркой. Отмечено хорошее соответствие с экспериментом.

В статье [65] описано моделирование испытания на прочность соединения алюминиевых деталей эпоксидным клеем горячего твердения. Отмечено



хорошее соответствие с экспериментальными данными. В работе [66] описаны особенности моделирования клеевых соединений. При моделировании клееных сборных деталей и композитов применяются специальные связующие элементы с ограниченной прочностью, выражающие свойства тонких слоев. Приведено сравнение результатов эксперимента и моделирования креш-тестов для клееных деталей и конструкций.

В работе [67] представлено исследование сварки взрывом, проведенное экспериментально, а также результаты моделирования деформирования деталей, соединенных сваркой и изготовленных из легких металлов- алюминевых, магниевых сплавов и технического титана. Эти материалы перспективны для автомобилестроения. В настоящее время сборка алюминиевых кузовов производится заклепками. Если добиться успеха сварки взрывом однородных и неоднородных материалов, то можно будет выпускать изделия превосходного качества без заклепок. Для выполнения качественной сварки необходимо контролировать механические процессы, например, желательно избегать волнового характера деформирования и высоких температур.

Статья [68] посвящена моделированию соединенных деталей с использованием заклепок с односторонним подходом (self piercing), сравнению различных моделей материалов. Указано хорошее соответствие с результатами экспериментов.

Ряд ТП в металлургии имеют выраженный механический характер. Например, для получения изделий высокого качества методом порошковой металлургии необходимо перед спеканием равномерно уплотнить порошок в форме. В работе [69] содержится общетеоретическое описание подхода ALE, возможностей и преимуществ перед лагранжевым или эйлеровым подходами при решении задач механики сплошных сред в гетерогенных механических системах. Рассмотрены примеры: уплотнение порошка, обтекание потоком прямоугольника, волна давления в колечатом лабиринте, ударная чеканка мелкого рельефа. Предметом статьи [70] является операция формовки (уплотнения) порошка металла, которая является процессом, которому присущи большие деформации, большие напряжения, нелинейное материальное поведение, а также трение. Объемная степень уплотнения порошков составляет 80-90%. При моделировании ALE используется модель пластичности *generalized cap plasticity model*. Эта модель отражает характеристики текучести, трения и плотности порошка в отношении деформаций и геометрического упрочнения, которые наблюдаются в течение процесса. Рассмотрены примеры формования смеси из нескольких разнородных порошков. Результаты дают возможность сделать вывод о пригодности предложенной ALE модели с применением *cap plasticity theory*. Описана процедура определения параметров

модели. Рассмотрены примеры моделирования. Подход может быть полезным при моделировании компактирования стружки перед переплавкой.

В статье [71] описано моделирование движения загрузки в горизонтальной вращающейся с шаровыми измельчителями мельнице при получении порошков. Использована смешанная модель ТС: загрузка моделируется с помощью SPH, а барабан- с помощью МКЭ.

В работе [72] рассмотрена процедура водяного охлаждения слитков в металлургическом прокатном производстве. Управление охлаждением слитка играет важную роль при производстве стали. Анализ теплообмена необходим для управления охлаждением стали для достижения заданных или новых свойств стали. Теплообмен на поверхности слитка обычно включает различные режимы — пленочное кипение, очаговое кипение, переходное кипение и радиационный теплообмен, что обуславливает сложность анализа. На практике часто используют эмпирические зависимости процесса кипения от скорости и давления жидкости внутри области контакта с поверхностью металла. Следовательно, чтобы лучшим образом управлять теплообменом с использованием эмпирических зависимостей, необходимо прежде исследовать гидродинамику струи. Круглые в сечении струи широко применяются в промышленности. Выполнены немногочисленные экспериментальные исследования отдельных струй, но их характеристики определены недостаточно.

Применение компьютерного моделирования для исследования гидродинамики ударной струи становится конкурентноспособным методом в сравнении с промышленными экспериментами. Применяется ALE в осесимметричной постановке.

Работа [73] посвящена исследованию нестационарного турбулентного течения со свободной поверхностью применительно к заливке металла из ковша в форму и включает в себя, кроме собственно моделирования течения со свободной поверхностью, еще и расчет термомеханических параметров в процессе заливки и остывания, что является основой для прогноза микроструктурных изменений металла. Анализ течения позволяет предупреждать дефекты заливки, например, раковины из-за раннего отверждения металла, перемещения включений, окисления из-за волнения, износа (разрушения) формы и др. Большинство моделей литья используют фиксированные сетки. В этом случае точность решения зависит от размера ячейки, что требует от аналитика в случае сложного течения процесса предугадывать важные особенности потока, например, удар струи об стенку, волнение, захват воздушных пузырей, образование поверхности раздела и т. п. В работе использован двумерный подход ALE, который позволяет выделить все отмеченные особенности в решении без предварительного их предположения. Приведены три примера, кото-

рые в сравнении с экспериментальными данными иллюстрируют достоверность метода.

Ниже приведены два примера моделирования, которые демонстрируют обширность предметной области моделирования.

В статье [74] отмечается, что полиэтиленовые бутылки в качестве тары нашли широкое применение и распространение. Они подвергаются значительным деформациям при высокоскоростном нанесении информации на поверхность, что может повредить бутылку или привести к дефектам нанесения информации. Для предотвращения брака необходимо принять специальные проектные решения при создании карусельной установки. Исследование и оптимизация процессов, сопровождающих нанесение надписей, проводится с использованием моделирования с применением лагранжева подхода и метода SPH.

В исследовании [75] с использованием как лагранжева, так и ALE подходов проведено систематическое изучение деформации частицы меди при холодном напылении. Обнаружено, что размер сетки модели в лагранжевом МКЭ существенно влияет на проявление локальной неустойчивости сдвига в интерфейсе. С уменьшением размера ячейки сетки скорость начала неустойчивости сдвига интерфейса понижается. Экстраполяция этих результатов дает разумную критическую скорость, сравнимую с действительной, используемой при проведении напыления. Результаты указывают, что как коэффициент уплотнения, так и коэффициент сжатия деформированных частиц увеличиваются с увеличением в скорости частицы, что хорошо согласуется с результатами эксперимента. Отмечено, что подход ALE обеспечивает более продуктивный путь изучения деформации частицы при холодном напылении.

Заключение

Моделирование ТП и ТС достигло высокого уровня развития на основе достижений прикладной механики систем тел FSI, новых методов численного решения соответствующих задач, а также ПО и компьютерной техники. Традиционные ТП, в общем, обеспечены разнообразными методиками моделирования, включая обоснованные механико-математические модели, методы и ПО. Наблюдается интенсивное развитие моделирования ТП и ТС как в направлении расширения и усложнения предметной области исследования, так и в направлении методов и возможностей исследования. Актуальной является разработка методик моделирования новых ТП с применением материалов, обладающих новыми технологическими свойствами.

В промышленности проявляется постоянный интерес к импульсным технологиям обработки материалов с применением жидкой передающей среды, что обусловлено использованием алюминиевых и

титановых сплавов, а также новых высокопрочных сталей и сложных форм изделий. Однако моделирование для изучения, проектирования и оптимизации соответствующих процессов не получило достаточного распространения. Целесообразно использовать имеющийся технологический опыт для разработки адекватных моделей импульсных технологических процессов, моделирования и исследования ТП и ТС импульсной обработки.

Моделирование выступает как конкурент, заместитель или дополнительный метод исследования в отношении эксперимента. Моделирование позволяет получить с высокой точностью важные для технологической теории и практики данные, которые трудно или невозможно получить в эксперименте. Объем синхронных данных при моделировании значительно превосходит таковой в эксперименте, в особенности при быстротекущих процессах, что открывает широкие возможности определения количественных зависимостей между параметрами процессов. В эксперименте часто невозможно разделить влияние различных факторов, комплексно определяющих течение ТП, в то время как при моделировании такое разделение естественно.

Моделирование ТП и ТС используется с различными намерениями:

- для исследования закономерностей и особенностей кинетики ТП и ТС, а также оптимизации ТП с учетом сложного взаимодействия, теплообмена, больших деформаций и особых материальных свойств элементов систем;
- для планирования последовательности и технологических параметров выполнения отдельных техопераций или технологических переходов в сложных ТП (технологических цепочках), включая сборку, с учетом изменений свойств и параметров заготовки и накопления этих изменений;
- для изучения поведения готовых изделий в условиях эксплуатации с учетом накопленных остаточных напряжений и деформаций;
- для разработки и оптимизации инструмента и оснастки по критериям качества изготовления деталей и изделий с учетом особенностей воздействия детали и материальных свойств элементов ТС, в том числе податливости и прочности;
- для накопления опыта технологического применения новых ТП, ТС и материалов;
- в образовательном процессе для обучения специалистов в области проектирования, оптимизации ТП и ТС, эффективного выполнения ТП, обслуживания и эксплуатации ТС.

Для моделирования ТП и ТС широко применяются различные методы (МКЭ, ALE, SPH, EFG), каждый из которых имеет свой сектор преимущественного применения; подчеркивается, что нет лучшего во всех отношениях метода. Для моделирования сложных гетерогенных ТС получают распро-



странение смешанные модели, использующие лучшие методы для дискретизации каждой из частей системы, что повышает эффективность и точность моделирования системы в целом. Использование различных методов для исследования некоторой ТС открывает возможность сравнительных расчетов по различным методам для обоснования точности и адекватности результатов моделирования в целом.

Для моделирования используется широкий ряд ПО, что связано с разнообразием задач. В этом ряду особое положение занимает ПО LS-DYNA. Многие известные ПО так или иначе используют это ПО. Например, ПО ANSYS использует LS-DYNA как внешнюю подпрограмму для решения динамических нелинейных задач, ПО NASTRAN имеет внешний интерфейс, ПО ABAQUS использует вычислительное ядро, ПО DYNAFORM является подмножеством, ориентированным на решение традиционных задач обработки металлов давлением.

Для эффективного применения моделирования необходимо соединение специалистов, обладающих необходимой квалификацией, соответствующего ПО и высокопроизводительных компьютеров. В связи с этим — важность и необходимость организации центров внедрения моделирования.

Достоверность результатов моделирования зависит от адекватности механико-математических моделей. В связи с этим — важность и необходимость образования специалистов, имеющих комплексные знания в области технологий, механики, ПО, методов решения.

Литература

1. Ferran A.R. Arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation of quasistatic nonlinear problems / A.R. Ferran-Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya, 1996. — 134 p.
2. Buchert J. Sheet metal forming: spring-back of hydro mechanical deep drawn parts / J. Buchert, D.K. Harrison, A. De Silva at all // 4rd European LS-DYNA Conference, Ulm, 2003. — P. E-1-35–E-1-42.
3. Maker B.N. Input parameters for springback simulation using LS-DYNA / B.N. Maker, X. Zhu // 3rd European LS-DYNA Conference, Paris, 2001, — 10 p.
4. Lim T. Springback simulation of the Numisheet 2005 benchmark II using DP600 (The effect of using 21 through thickness integration points and using a static implicit finish to the forming simulation) / T. Lim, T. Dietrich // 9th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2006. — P. 17-9–17-22.
5. Oshita F. High efficient and powerful integrated design support system “DYNA-Works” / F. Oshita, O. Kunieda // 6th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2000. — P. 16-15–16-20.
6. Keigler M. Fea-calculation of the hydroforming process with LS-DYNA / M. Keigler, H. Bauer, D.K. Harrison at all // 8th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2004. — P. 2-15–2-22.
7. D’Amours G. Warm forming simulation of 7075 aluminium alloy tubes using LS-DYNA / G. D’Amours, J.F. Beland // 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg, May 2011. — 12 p.
8. An H. Optimization and sensitivity analysis of numerical simulation of tubular hydroforming / H. An, D.E. Green // 10th International LS-DYNA Conference Detroit, 2008. — P. 17-9–17-20.
9. Zettler J. Incremental sheet forming- process simulation with LS-DYNA / J. Zettler, H. Rezai, B. Taleb-Araghi at all // 6 LS-DYNA anwenderforum, Frankenthal, 2007. — S. C-I-9–C-I-20.
10. Jan F.-C. Simulation of cold roll forming of steel panels / F.-C. Jan, O. Onipede // 6th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2000. — P. 14-1–14-12.
11. Dutton T. Simulating the complete forming sequence for a roll formed automotive bumper beam / T. Dutton, P. Richardson, M. Tomlin at all // 6th European LS-DYNA Conference, Gothenburg, 2007. — P. 5-103–5-112.
12. Ma Y. Recent development for metal forming simulation / Y. Ma, N. Ma // 5th European LS-DYNA Conference, Birmingham, 2005. — P. 1-16.
13. Roll K. Simulation of sheet metal forming- necessary developments in the future / K. Roll // 7th LS-DYNA forum, Bamberg 2008. — P. A-I-59–A-I-68.
14. Chen X. Practical optimization for automotive sheet metal components / X. Chen, O. Ghouati // 6th European LS-DYNA Conference, Gothenburg, 2007. — P. 4.37–4.46.
15. Ghouati O. Sheet metal forming simulation- closing the design loop / O. Ghouati, X. Chen // 5 LS-DYNA anwenderforum, Ulm 2006. — S. I-I-25–I-I-34.
16. Pannier S. Increasing reliability of metal forming processes in early design stages / S. Pannier, K. Grosenbacher, M. Liebscher at all // 9th LS-DYNA forum, Bamberg, 2010. — P. C-II-17–C-II-28.
17. Gokhale A.S. Sheet metal forming in a virtual reality environment using LS-DYNA and neural networks / A.S. Gokhale // 4rd European LS-DYNA Conference, Ulm, 2003. — P. E-III-23–E-III-36.
18. Accotto A. On the optimization of the punch-die shape: an application of new concepts of tools geometry alteration for springback compensation / A. Accotto, G. Anedda, M. Sperati at all // 5th European LS-DYNA Conference, Birmingham, 2005. — P. 1-10.
19. Dutton T. Tool design for a high strength steel side impact beam with springback compensation / T. Dutton, R. Edwards, A. Blowey // 5th European LS-DYNA Conference, Birmingham, 2005. — P. 1-10.
20. Jemberg A. A method for modifying the forming tool geometry in order to compensate for springback effects / A. Jemberg // 4rd European LS-DYNA Conference, Ulm, 2003. — P. E-III-45–E-III-54.
21. Raquet J. Concepts to consider tool elasticity in forming simulations with LS-DYNA / J. Raquet,

S. Mandel, D. Lorenz at all // 7th LS-DYNA forum, Bamberg 2008. — P. C-IV-3–C-IV-12.

22. *Kuroda K.* Forming of alloy plate by underwater shock wave of explosive / K. Kuroda, H. Hamada, H. Hamashima at all // 6th European LS-DYNA Conference, Gothenburg, 2007. — P. 5.127-5.136.

23. *Betrstad T.* Formability modeling with LS-DYNA / T. Betrstad, O.-G. Lademo, K.O. Pedersen at all // 8th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2004. — P. 6-53–6-64.

24. *Dutton T.* Review of sheet metal forming simulation progress to date, future developments / T. Dutton // 8th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2004. — P. 9-1–9-10.

25. *Jurendi S.* Deep drawing simulation of -titanium alloys using LS-Dyna / S. Jurendi, S. Gaiani // 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg, May 2011. — 8 p.

26. *Isik K.* Analysis of formability of advanced high strength steel sheets with phenomenologically based failure criteria with separate treatment of instability, shear and normal fracture / K. Isik, C. Soyarslan, H. Richter at all // 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg, May 2011. — 11 p.

27. *Samekto H.* Finite element analysis of superplastic forming process using LS-DYNA / H. Samekto, K. Roll // 4rd European LS-DYNA Conference, Ulm, 2003. — P. E-II-01–E-II-16.

28. *Borvik T.* Finite element analysis of ductile failure in structural steel subjected to multiaxial stress states and high strain rates / T. Borvik, O.S. Hopperstad, T. Berstad at all // 3rd European LS-DYNA Conference, Paris, 2001. — 11 p.

29. *Lu H.* An improved 3d adaptive EFG method for forging and extrusion analysis with thermal coupling in LS-DYNA / H. Lu, T. Wu // 11th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2010. — p. 10-37–10-44.

30. *Kulkarni P.* Influence of the effect of strain rates on springback in aluminium 2024 (ISO Al Cu₄Mg₁) / P. Kulkarni // 4rd European LS-DYNA Conference, Ulm, 2003. — P. E-II-27–E-II-34.

31. *Kim H.* The evaluation of crashworthiness of vehicles with forming effect / H. Kim, S. Hong, S. Hong at all // 4rd European LS-DYNA Conference, Ulm, 2003. — P. B-I-25–B-I-34.

32. *Dutton T.* The influence of residual effects of stamping on crash results / T. Dutton, P. Richardson, A. Knight at all // 3rd European LS-DYNA Conference, Paris, 2001, 8 p.

33. *Hartmann S.* About isogeometric analysis and the new NURBS-based finite elements in LS-DYNA // S. Hartmann, D.J. Benson, D. Lorenz // 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg, May 2011. — 10 p.

34. *Borrvall T.* Mortar contact algorithm for implicit stamping analysis in LS-DYNA / T. Borrvall // 10th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2008. — P. 7-19–7-28.

35. *Volk W.* Virtual engineering and planning process in sheet metal forming / W. Volk, P. Charvet // 7th European LS-Dyna conference, Solzburg, 2009. — P. 1–12.

36. *Clarke M.* Sheet metal forming simulation and real world tooling / M. Clarke, J. He // 10th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2008. — P. 2-27–2-34.

37. *Hora P.* Advanced constitutive models as precondition for an accurate FEM-simulation in forming simulation // P. Hora // 5 LS-DYNA anwenderforum, Ulm, 2006. — P. A-II-1–A-II-74.

38. *Zhu X.* A more accurate approach to evaluate material formability / X. Zhu // 9th LS-DYNA forum, Bamberg, 2010. — P. C-II-1–C-II-4.

39. *Wu C.T.* New features in LS-DYNA EFG method for solids and structures analysis / C.T. Wu // 7th European LS-Dyna conference, Solzburg, 2009. — P. 1–15.

40. *Wu C.T.* The development of XFEM fracture and mesh-free adaptivity / C.T. Wu, Y. Guo, H.C. Lu // 5 LS-DYNA anwenderforum, Ulm, 2006. — P.G-I-1–G-I-14.

41. *Lu H.* Forging and extrusion analysis with LS-DYNA basing 3d adaptive EFG method / H. Lu, C.T. Wu, J. Xu // 10th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2008. — P.17-21–17-24.

42. *Hu W.* LS-Dyna meshfree interactive adaptivity and its application / W. Hu, C.T. Wu, K. Saito // 11th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2010. — p. 10-21–10-26.

43. *Wang J.* Arbitrary Lagrangian-Eulerian method and its application in solid mechanics: a thesis for for the degree of doctor of philosophy in the university of British Columbia / J. Wang. — 1998. — 186 p.

44. *Aquelet N.* ALE modeling of surface waves / N. Aquelet // 6th European LS-DYNA Conference, Gothenburg, 2007. — P. 4.9–4.20.

45. *Ganvir V.* Prediction of extrudate swell in polymer melt extrusion using an Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) based finite element method / V. Ganvir, A. Lele, R. Thaokar, B.P. Gautham. — P. 21–28.

46. *Zhuang X.* Simulation of sheet metal extrusion processes with Arbitrary Lagrangian-Eulerian method / Zhuang X., Zhao Z., Xiang H. at all // Transactions of nonferrous metals society of China. — 2008. — v.18. — P. 1172–1176.

47. *Iyama H.* Numerical simulation of aluminum alloy forming using underwater shock wave / H. Iyama, K. Takahushi, T. Hinata at all // 8th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2004. — P. 13-1–13-6.

48. *Ma Q.W.* On techniques for simulation effects of cavitation associated with the interaction between structures and underwater explosions using LS-DYNA / Q.W. Ma, D.J. Andrews // 3rd European LS-DYNA Conference, Paris, 2001. — 12 p.

49. *Quidot M.* Some examples of energetic material modeling with LS-DYNA / M. Quidot // 3rd European LS-DYNA Conference, Paris, 2001. — 9 p.

50. *L'Eplattenier P.* An MPP version of the electromagnetism module in LS-DYNA for 3d coupled mecha-



nical-thermal-electromagnetic simulations / P. L'Eplattenier, C. Ashcraft // 11th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2010. — p. 10-45–10-60.

51. *L'Eplattenier P.* Introduction of an electromagnetism module in LS-DYNA for coupled mechanical-thermal-electromagnetic simulation / P. L'Eplattenier, G. Cook, C. Ashcraft // 9th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2006. —P. 17-1–17-8.

52. *Shang J.* Numerical simulation and experimental study of electromagnetic forming / J. Shang, P. L'Eplattenier, L. Wilkerson // 11th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2010. — p. 10-27–10-36.

53. *Imbert J.* Comparison between experimental and numerical results of electromagnetic forming processes / J. Imbert, P. L'Eplattenier, M. Worswick // 10th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2008. — P. 12-33–12-44.

54. *Robinson A.C.* ALEGRA: An arbitrary Lagrangian-Eulerian multimaterial, multiphysics code / A.C. Robinson, T.A. Brunner, S. Carroll at all // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit., 7-10 January 2008, Reno, Nevada.— AIAA. — 2008. —1235.— 39 p.

55. *Arrazola P.J.* Finite element modeling of chip formation process with ABAQUS/EXPLICIT 6.3./ P.J.Arrazola, D.Ugarte, J.Montoya // VIII International Conference on Computational Plasticity: COMPLAS VIII: E. Onate and D. R. J. Owen, eds.— Barcelona: CIMNE, 2005. — 4 p.

56. *Gyliene V.* Cowper-Symonds material deformation law application in material cutting process using LS-DYNA FE code: turning and milling / V. Gyliene, V. Ostasevicius // 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg, may 2011. — 12 p.

57. *Raczy A.* An Eulerian element model of the metal cutting process / A. Racy, W.J. Altenhof, A.T. Alpas // 8th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2004. — P. 9-11–9-26.

58. *Akarca S.S.* A smoothed-particle hydrodynamics (SPH) model for machining of 1100 aluminium / S.S. Akarca, W.J. Altenhof, A.T. Alpas // 10th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2008. — P. 12-1–12-8.

59. *Villumsen M.F.* Simulation of metal cutting using smooth particle hydrodynamics / M.F. Villumsen, T.G. Fauerholdt // 7th LS-DYNA forum, Bamberg 2008. — P. C-III-17–C-III-36.

60. *Espinosa C.* Modeling high speed machining with SPH method / C. Espinosa, J.L. Lacombe, J. Limido at all // 10th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2008. — P. 12-9–12-20.

61. *Arrazola P.J.* Numerical modelling of 3-D hard turning using arbitrary Eulerian Lagrangian finite element method / P.J. Arrazola, T. Ozel // 2008. — 14 p.

62. *Medvedev S.* Modeling of welding seam sequences / S. Medvedev, M. Petrushina, O. Tchij // 5th European LS-DYNA Conference, Birmingham, 2005. —P. 1-10.

63. *Medvedev S.* Modeling of welded structures residual strains / S. Medvedev, M. Petrushina, O. Tchij //

8th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2004. — P. 7-21–7-30.

64. *Schweizerhof K.* Improved spotweld simulation with LS-DYNA. —Numerical simulation and comparison to experiments / K. Schweizerhof, W. Schmid, H. Klamser // 3rd European LS-DYNA Conference, Paris, 2001. — 9 p.

65. *Clarke M.* Characterisation and simulation of structural adhesives / M. Clarke, M. Buckiey, J.G. Broughton at all // 7th European LS-Dyna conference, Solzburg, 2009. — P. 1–9.

66. *Marzi S.* Usage of cohesive elements in crash analysis of large, bonded vehicle structures. Experimental tests and simulation / S. Marzi, L. Ramon-Villalonga // 7th LS-DYNA forum, Bamberg 2008. — P. B-I-1–B-I-20.

67. *Matsui Y.* Explosive welding of light weight metal sheet / Y. Matsui, M. Otsuka, T. Hinata at all // 8th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2004. — P. 8-59–8-66.

68. *Sommer S.* Failure modeling of a self piercing riveted joint using LS-DYNA / S. Sommer, J. Maier // 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg, may 2011. — 11 p.

69. *Donea J.* Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods / J. Donea, A. Huerta, J.-Ph. Ponthot at all // Encyclopedia of Computational Mechanics. Edited by E. Stein, R. de Borst, T. J.R. Hughes. — 2004 John Wiley & Sons, Ltd. — P. 1-38.

70. *Khoei, A.R.* An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite-element method for cone-car plasticity; application to powder compaction simulation / A.R. Khoei, M. Anahid, A.R. Azami at all // European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2004), Jyvaskyla, 24–28 July 2004. — P. 1-19.

71. *Jonsen P.* Simulation of charge and structure behaviour in a tumbling mill / P. Jonsen, B.I. Palsson, H.-A. Haggblad at all // 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg, may 2011. — 14 p.

72. *Maghjian H.* Simulation of hydrodynamics of the jet impingement using arbitrary Lagrangian Eulerian formulation: a thesis for for the degree of doctor of philosophy in the university of British Columbia / H.Maghjian. — 2007. — 133 p.

73. *Gaston L.* An arbitrary Lagrangian Eulerian finite element approach to non steady state turbulent fluid flow with application to mould filling in casting / L. Gaston, A. Kamara, M. Belle // Int. J. Num. Meth. Fluids. — 2000. —34. — P. 341-369.

74. *Chittepu B.* Deformation behaviour of filled and capped PET bottles in high-speed labeling machine / B. Chittepu, M. Hormann, U. Stelzmann at all // 7th European LS-Dyna conference, Solzburg, 2009. — P. 1–5.

75. *Li W.-Y.* On high velocity impact of micro-sized metallic particles in cold spraying / W.-Y. Li, H. Liao, C.-J. Li at all // Applied surface science. — 2006. — 253. — P. 2852–2862.