

УДК 539.3

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА В НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

© 2011 г.

Р.В. Гольдштейн¹, Н.Ф. Морозов²

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

³Санкт-Петербургский госуниверситет

goldst@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Для современных наукоемких технологий характерны процессы деформирования и разрушения в широком диапазоне геометрии и типов объектов, видов и параметров воздействий (интенсивности и длительности). Нередко наряду с механическими нагрузками включают действие физических полей и активных сред. Потребности в описании этих процессов, оптимизации параметров технологий и прогнозировании механических характеристик продукции приводят к новым фундаментальным проблемам механики твердого деформируемого тела (МДТТ). Рассмотрены характерные классы возникающих проблем МДТТ, пути их решения. Изложение частично опирается на результаты исследований авторов и их коллег.

Ключевые слова: фундаментальные проблемы, механика деформируемого твердого тела, наукоемкие технологии, обзор.

Процессы деформирования и/или разрушения являются неотъемлемой частью одних технологий и сопутствующими других, будь то технологии обработки материалов давлением, резания и измельчения, вытягивания волокон и монокристаллов из расплава, осаждения пленок или многослойных покрытий на подложку. Присущие современной технике тенденции к миниатюризации и укрупнению изделий, конструкций и сооружений, к созданию материалов с многомасштабной структурой и текстурой привели к необходимости моделирования и прогнозирования механического поведения объектов как атомного и наномасштаба, так и масштабов десятков сантиметров, десятков и сотен метров. Расширился диапазон и интенсивность воздействий в технологиях, повысились требования к долговечности, надежности, живучести и безопасности сложных технических систем. Все это привело к новым фундаментальным проблемам МДТТ.

При описании того или иного процесса в рамках МДТТ основой моделей служат определяющие уравнения. Необходимо построение определяющих уравнений для ряда процессов и материалов. В частности, к таким материалам относятся гранулированные и пористые среды; традиционные металлы и сплавы, условие текучести которых зависит от среднего напряжения; труднодеформируемые металлы и сплавы, обработка которых должна производиться при повышенных

температурах. Для таких материалов отсутствуют общепринятые определяющие уравнения. Из соответствующих процессов следует отметить процессы интенсивной пластической деформации и процессы, происходящие в тонком слое материала вблизи поверхностей трения. В этих случаях, по-видимому, требуются качественно новые подходы к построению определяющих уравнений, вследствие интенсивного вращательного движения частиц материала относительно главных направлений тензора напряжения и тензора скорости деформации. Особо следует отметить необходимость развития определяющих уравнений для процессов деформирования, происходящих под действием нагрузок, отличных от традиционных (механических и термических). Например, формоизменение под действием электрического и/или магнитного полей.

Применительно к технологиям интенсивной пластической деформации, разрабатываемым и используемым для получения материалов с наноразмерными элементами структуры (таким, как равноканальное угловое прессование или сжатие с кручением), отсутствуют определяющие соотношения и модели процессов, которые позволили бы предсказывать кинетику изменения структуры в зависимости от технологических параметров.

Переход в область нанотехнологий приводит к необходимости учета и моделирования влияния

особых механических свойств свободных поверхностей, границ структурных элементов и пограничных слоев в сравнении с соответствующими деформационными характеристиками в объеме. Хотя сама потребность в учете поверхностных эффектов была осознана довольно давно при появлении технологий спекания, только при переходе к наномасштабным структурам эти эффекты стали во многом определяющими.

Потребности в создании поверхностей и поверхностных слоев с заданным распределением геометрических и механических характеристик привели к развитию наукоемких технологий обработки поверхностей и постановке ряда проблем МДТТ. Среди них отметим моделирование и оптимизацию процессов высокоскоростного резания для получения чистоты поверхности, не требующей финишной обработки; разработку моделей процессов и расчет параметров химико-механического полирования; моделирование образования дефектов и неоднородностей в поверхностных слоях с целью управления их распределением (в частности, создания приповерхностных зон, свободных от дефектов и неоднородностей) посредством термообработки или иных физико-химических воздействий; моделирование и оптимизация механических и физико-химических характеристик функционально-градиентных слоев и многослойных покрытий. Эти проблемы важны, к примеру, для микро- и нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники.

Прогнозирование разрушения в технологических процессах требует дальнейшего развития моделей и методов нелинейной механики разрушения. Так, например, в большинстве общепринятых подходов к построению теорий пластического разрушения предполагают, что теория имеет силу при достаточно произвольных условиях деформирования. В связи с этим при применении простых теорий добиться согласия теории с экспериментом довольно сложно. С другой стороны, количество существенно различных типов разрушения относительно невелико. Например, в процессах обработки металлов давлением можно выделить: разрушение на свободной поверхности, разрушение на оси симметрии, разрушение вблизи поверхностей трения. Вследствие этого представляется целесообразным развивать теории пластического разрушения для отдельных типов разрушения с учетом многомасштабной структуры и текстуры материала и механизмов перехода разрушения с одного масштаба на другой. Необходимы значительные дополнительные исследования для выявления влияния третьего инварианта тензора напряжения, геометрических сингуляр-

ностей деформируемого тела и угловых точек на пути деформирования на предсказательную способность теорий пластического разрушения.

Важный круг проблем МДТТ связан с дизайном технологических процессов.

Теоретический аспект проблем дизайна технологических процессов во многом определяется развитием аналитических и численных методов. Стандартные пакеты прикладных программ не позволяют решить проблему дизайна. Применение специальных методов, основанных исключительно на конечно-элементной аппроксимации решения, также встречает значительные трудности (например, для получения стабильных результатов с использованием анализа чувствительности необходимо найти достаточно точное начальное приближение).

Следует отметить, что свойства материала при сложном напряженно-деформированном состоянии и действии физических полей известны достаточно приближенно. Поэтому повышение точности решения математической краевой задачи для процесса деформирования необязательно увеличивает точность решения инженерной задачи. Следовательно, эффективный метод дизайна должен сбалансировано включать как аналитические, так и численные подходы, а соответствующие определяющие уравнения должны быть максимально упрощены. Желательно применение многоуровневых подходов, когда первоначальный дизайн следует из элементарных моделей с последующим уточнением.

Для получения формы изделия после обработки давлением, максимально приближенной к форме окончательного изделия, во многих случаях необходимо включать в рассмотрение не только пластически деформируемый материал, но и упруго деформируемый инструмент. Трудности обеспечения заданных параметров изделий связаны и с необходимостью учета эффектов релаксации и ползучести при разгрузке, которые могут приводить к нежелательным сценариям деформирования, например к короблению тонкого листа или тонкостенных элементов изделий и конструкций. Перспективным направлением реализации теоретических решений дизайна является процесс последовательного локального деформирования (*incremental forming*), позволяющий значительно ослабить требования в отношении геометрической формы инструмента.

Особо отметим проблемы экспериментальной МДТТ, связанные с необходимостью определения механических характеристик очень малых (нано- и микромасштабных) и очень больших (метрового масштаба) образцов в условиях сложного на-

гружения (в том числе нестационарного), мониторинга параметров технологических процессов. Здесь требуется разработка новых схем испытаний, испытательных устройств и систем, систем мониторинга и идентификации параметров процессов.

Наконец, проектирование и реализация наукоемких технологий требуют развития представлений о масштабных эффектах в технологиях и изменчивости механических свойств и методов их моделирования. Заметим, что обычно при физическом моделировании стремятся предсказать поведение крупногабаритного объекта по резуль-

татам испытания его уменьшенной модели. Переход в область нано- и микромасштабов приводит к противоположной постановке вопроса о возможности моделирования механического поведения маломасштабного объекта по результатам испытания его более крупной модели. Ввиду многопараметричности большинства технологий все большее развитие получают представления и методы виртуальных испытаний, позволяющие существенно уменьшить количество реальных экспериментов. Эффективность такого подхода существенно зависит от совершенства механических моделей рассматриваемых процессов.

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF SOLID MECHANICS IN HIGH TECHNOLOGIES

R.V. Goldstein, N.F. Morozov

Processes of deformation and fracture in a broad range of geometry and types of objects, types and parameters of actions (intensity and duration) are inherent to modern high technologies. The actions often include actions of physical fields and active media along with mechanical loads. The need for the description of these processes, optimization of technological parameters and prediction of mechanical characteristics of the products lead to new fundamental problems of solid mechanics (SM). The present paper reviews the characteristic classes of arising SM problems, approaches and examples of their solving. The paper is partly based on the results obtained by the present authors and their colleagues.

Keywords: fundamental problems, solid mechanics, high technologies, review.