

УДК 621.793.7

В.С. КРИВЦОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***О ВЫБОРЕ МОДЕЛЕЙ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК В АВИА- И АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ**

Рассматриваются статические упругопластические задачи и соответствующие математические модели, их преимущества и недостатки, а также подходы различных авторов к выбору моделей и их реализации на вычислительной технике. Приведены рекомендации технологу по выбору необходимой модели и метода вычислений.

упруго-пластическое деформирование, листовые заготовки, авиастроение, автомобилестроение**Введение**

Развитие информационных технологий в современной инженерной деятельности позволяет значительно сократить сроки и снизить затраты на разработку сложных технологических процессов и оборудования, в частности, технологию листовой штамповки. Применение в авиации, автомобилестроении высокопрочных листовых материалов, их обработка с высоким качеством и точностью поверхности в настоящее время базируется на создании математических моделей статического и динамического упруго-пластического деформирования и определении расчетными методами основных технологических параметров. По сравнению с экспериментальной отработкой всех технологических приемов, определением параметров, теоретический подход на основании адекватных моделей позволяет значительно сократить сроки разработки соответствующих технологий и снизить затраты на подготовку производства.

Решению задач моделирования процессов деформирования листовых заготовок посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов [1 – 3]. Существует также множество расчетных программ и пакетов, которые не всегда в полной мере учитывают реальные физические процессы, происходящие в материале и оснастке

при деформировании листовых заготовок. Опытные, хорошо теоретически подготовленные инженеры, в меньшей мере испытывают затруднения в выборе технологических параметров, но они, как правило, хуже владеют современной вычислительной техникой, чем молодые специалисты. В то же время молодой инженер, хорошо владеющий вычислительной техникой, зачастую плохо представляет физические процессы и испытывает затруднения в выборе наиболее подходящих моделей и соответствующего программного обеспечения для расчетов.

Автор в данной статье предпринял попытку помочь молодому инженеру в решении этой проблемы.

Задачи пластичности при статическом нагружении заготовки

Свойство пластичности проявляется, когда действующие в материале напряжения превышают предел упругости. При этом в результате растяжения зависимость между напряжениями и деформациями становится нелинейной и является базой при построении теории пластичности. В случае сложного напряженного состояния зависимость между нагрузками и перемещениями перестает быть однозначной и зависит от порядка приложения нагрузок. При этом учет всех возможных форм деформирования приводит к трудноразрешимым математическим

задачам. Для упрощения материалу приписывается ряд свойств, которые в той или иной степени соответствуют реальности [1].

Сначала рассмотрим теоретические схемы решения статических упругопластических задач.

Наибольшее распространение в инженерных приложениях получили деформационная теория пластичности и теория течения. Деформационная теория пластичности была разработана А.А. Ильюшиным [2]. Деформации в ней представляются в виде сумм упругих и пластических. Упругие подчиняются закону Гука, а компоненты пластических деформаций пропорциональны компонентам девиатора напряжений. Коэффициент пропорциональности устанавливается из условия текучести Мизеса. При этом зависимость эквивалентных напряжений от эквивалентных деформаций принимается такой же, как закон деформирования материала при одном нагружении.

Указанные формальные соотношения логически вытекают из теоремы А.А. Ильюшина о простом нагружении – внешние нагрузки возрастают пропорционально одному параметру. Для того чтобы выполнялось простое нагружение, материал должен быть несжимаем и зависимость между эквивалентными напряжениями и деформациями степенной. При нагружении, близком к простому, деформационная теория пластичности может давать результаты, согласующиеся с экспериментом [1]. Однако в практике условия пропорционального нагружения могут не выполняться, поэтому большее применение при построении вычислительных схем в последние годы получила теория течения.

Для построения математической модели теории течения упрочняющихся тел весьма плодотворной оказалась модель поверхности нагружения, а уравнение этой поверхности называют функцией нагружения. Если поверхность представляет собой геометрическое место пределов текучести при всевозможных путях нагружения, то ее называют поверх-

ностью текучести. Друкер [3] сформулировал постулат о неотрицательности приращения работы пластической деформации в процессе дополнительного нагружения, из которого следует свойство выпуклости поверхности текучести.

Основные положения теории течения следующие:

- приращение полной девиаторной деформации de_{ij} представляется в виде суммы упругой de_{ij}^e и пластической de_{ij}^p компонент;
- упругие компоненты подчиняются закону Гука;
- из постулата Друкера следует принцип градиентности, в соответствии с которым пластическое течение при активном нагружении развивается по нормали к поверхности текучести.

Принцип градиентности описывается уравнением

$$de_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (1)$$

где $d\lambda$ – бесконечно малый неотрицательный скалярный множитель, который в общем случае зависит от деформационного упрочнения и истории нагружения – $\sigma_{ij}, d\sigma_{ij}$ и e_{ij} .

Поверхность текучести описывается цилиндром Мизеса:

$$F(\sigma_{ij}) = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} - \sigma_T^2 = 0, \quad (2)$$

где S_{ij} – девиаторные напряжения; σ_T – мгновенный предел текучести.

Тогда

$$de_{ij}^p = d\lambda \cdot S_{ij}. \quad (3)$$

При записи этих выражений применено правило суммирования по повторяющимся индексам.

По характеру трансформации поверхностей нагружения при упругопластическом деформировании материала судят о закономерностях его деформационного упрочнения. Если свойства материала не зависят от времени, а процесс деформирования – изотермический, то считается, что при произволь-

ной системе напряжений возможны следующие виды упрочнения: изотропное, трансляционное (кинематическое), комбинированное [4].

При разгрузке (пассивное деформирование) пластическая деформация сохраняется, а упругая исчезает. Зависимость напряжений от деформаций будет линейной с углом наклона, определяемым модулем упругости E . Если продолжить разгрузку с переходом через ноль, то предел текучести обратного знака снижается настолько, насколько увеличился предел текучести при активном деформировании. Это явление известно как эффект Баушингера и описывается моделью кинематического упрочнения.

В работе [4] отмечено, что эффект кинематического упрочнения преобладает на начальной стадии деформирования ($\varepsilon_p < 2\%$), а при дальнейшем нагружении основное значение приобретает изотропное упрочнение.

В действительности поведение реальных материалов может существенно отклоняться от рассмотренных идеальных моделей, что затрудняет построение адекватных расчетных схем в практике инженерных расчетов.

Нелинейность физического закона приводит к значительным математическим трудностям при решении задач пластичности аналитическими методами. При этом упрощения относятся, прежде всего, к закону деформирования – идеальное упругопластическое и жестко-пластическое тело. Круг аналитически решенных задач ограничен двумерными случаями и каноническими формами областей [1, 5].

Среди численных методов в последние годы, безусловно, доминирует метод конечных элементов (МКЭ). Учитывая универсальность метода и его широкое распространение в виде промышленных пакетов программ, необходимо обратить внимание на фундаментальные монографии, посвященные численной реализации МКЭ [6 – 7].

Следует отметить, что в большинстве работ алгоритмы МКЭ построены на основе теории пластического течения. Хотя эта теория в математическом

отношении более сложная, но не имеет ограничений, налагаемых теоремой о простом нагружении [2].

В упругопластической области в методе конечных элементов уравнения равновесия тела записываются для приращений величин перемещений. Искомые приращения напряжений должны удовлетворять при этом условию равновесия. Для решения нелинейной задачи используются три основных итерационных метода:

- метод касательной жесткости;
- метод переменных параметров упругости;
- методы начальных деформаций и напряжений.

Общая идея этих методов состоит в удовлетворении некоторых условий сходимости путем последовательных приближений.

Анализ преимуществ и недостатков методов с точки зрения их точности и вычислительных затрат дан в [8]. Заметим, однако, при исследовании новых технологических процессов ставится цель изучения процессов деформирования деталей, а не создания новых алгоритмов и программ. Поэтому технологу необходимо сделать выбор не только метода, но и программы, наилучшим образом подходящей для целей проектирования нового технологического процесса.

В настоящее время в распоряжении технолога имеется большой выбор промышленных программ метода конечных элементов. В обзоре [9] приведены краткие характеристики программных комплексов, в большинстве которых реализованы алгоритмы решения нелинейных задач. Однако упругопластические задачи решаются в статической постановке, а динамические – в линейной.

Таким образом, прямо воспользоваться известными программами для достижения поставленной цели невозможно. Необходимо подключение новых алгоритмов и значительные доработки программ.

В качестве примера рассмотрим конечно-элементную программу PAPST [10]. Основу программы составляют кубические 12-ти и 9-ти узловые изопараметрические конечные элементы. В программу

включены алгоритмы решения упругопластических статических задач на основе теории течения и метода касательной жесткости (переменных параметров упругости). При сочетании метода конечных элементов с методом переменных параметров упругости в [10] доказана локальная сходимость, означающая сходимость итерационного процесса, если начальное приближение является произвольным, но достаточно близким к точному. Отсюда следует вывод о важности выбора шага приращения нагрузки в расчетах. Программа [10] позволяет решать задачи пластического деформирования различных деталей из оболочечных заготовок при больших пластических деформациях, что наилучшим образом соответствует поставленным целям. Однако учет динамических эффектов, связанных с высокоскоростным деформированием и наличием формообразующей (в большинстве случаев) поверхности матрицы, требует ее существенной доработки.

Выводы

На основании вышеизложенного и анализа литературных источников, указанных в статье, можно сделать следующие выводы:

1. Специалист, занимающийся разработкой технологических процессов, связанных с упругопластическим деформированием листовых заготовок и производством высокоточных формообразующих деталей, должен уметь обосновать выбор наиболее достоверной модели деформирования материала.

2. Из существующих программных средств следует использовать только те, которые наиболее полно и комплексно учитывают особенности выбранной модели.

3. При расчетах необходимо помнить, что до сих пор отсутствуют реализованные в программных средствах модели, которые одновременно и комплексно учитывают следующие особенности упруго-пластического деформирования:

– контактное взаимодействие заготовки с по-

верхностью матрицы и учет при этом сил трения;

– учет физической нелинейности при комбинированном упрочнении материала в процессе пластического деформирования;

– влияние скорости деформаций на предел текучести материала.

Литература

1. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. 2-е изд. – М.: Наука, 1998. – 712 с.
2. Илюшин А.А. Пластичность. – М.: Гостехиздат, 1948. – 412 с.
3. Druker D.C. Basic concept, Plasticity and Viscoelasticity // Handbook of Engineering Mechanics. – New York: McCraw Hill, 1962. – P. 46-3 – 46-16.
4. Ковальчук Б.И., Лебедь А.А., Уманский С.Э. Механика неупругого деформирования материалов и элементов конструкций. – К.: Наук. думка, 1987. – 280 с.
5. Безухов Н.И. Введение в теорию упругости и пластичности. – М.: Стройиздат, 1950. – 248 с.
6. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
7. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
8. Морозов Е.М., Никишов Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
9. Метод конечных элементов в механике конструкций / Сост. Н.Н. Калинина, Е.Н. Старыгина. – ЦАГИ, 1989. – 116 с.
10. Gifford L.N., Hilton P.D. Preliminary Documentation of PAPST – nonlinear Fracture and Stress Analysis by Finite Elements. – D.W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, Maryland, 1981. – 76 p.

Поступила в редакцию 15.12.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.