

Афонин А.Н.  
ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В DEFORM И LS-DYNA**

Теоретическое исследование обработки металлов давлением и резанием и ряда других процессов, сопровождающихся значительной пластической деформацией и разрушением материалов, во многих случаях на сегодняшний день возможно только с помощью численных методов, в частности метода конечных элементов (МКЭ). На основе МКЭ в настоящее время создано большое количество систем инженерного анализа. Возможности данных программных продуктов существенно различаются. Выбор необходимой для решения сложных нелинейных задач системы зачастую представляет серьезную проблему. Одним из важнейших критериев выбора является возможность моделирования с помощью данной системы разрушения материала.

Системы инженерного анализа в настоящее время принято разделять на универсальные и специализированные (рис. 1).

К универсальным системам инженерного анализа относят такие программные продукты, как ANSYS, ABAQUS, MSC.NASTRAN и др. Эти программные продукты позволяют решать широкий круг задач, связанных с моделированием физических полей различной природы: напряжений и деформаций, тепловых, электромагнитных и т.д. Программные продукты данной группы имеют конструкторскую направленность и обеспечивают возможность моделирования только упругих и незначительных пластических деформаций. Построение сетки конечных элементов в них основано на лагранжевом подходе. При этом отсутствует либо существенно ограничено автоматическое адаптивное переразбиение модели на конечные элементы при значительной деформации, искажающей форму отдельных элементов больше критической величины. Таким образом, адекватно моделировать разрушения материалов при значительной пластической деформации в данных системах невозможно.

В особую группу универсальных систем инженерного анализа можно выделить пакеты программ LS-DYNA и MSC.Marc. Эти системы позволяют исследовать сложные процессы со значительной пластической деформацией и разрушением, поскольку имеют функцию автоматического адаптивного переразбиения сетки конечных элементов, возможность реализации лагранжевой, эйлеровой и комбинированной сетки. Данные программные продукты нашли применение для научных исследований в самых разных областях науки и техники для решения задач соударения, взрыва, обработки металлов давлением и резанием и т.д.

Однако, даже такие универсальные системы инженерного анализа, как LS-DYNA и MSC.Marc, имеют ограниченный набор критериев разрушения деформируемого материала. В качестве подобных критериев в них, как правило, используются максимально допустимые напряжения или деформации, при достижении которых конечный элемент удаляется из модели.

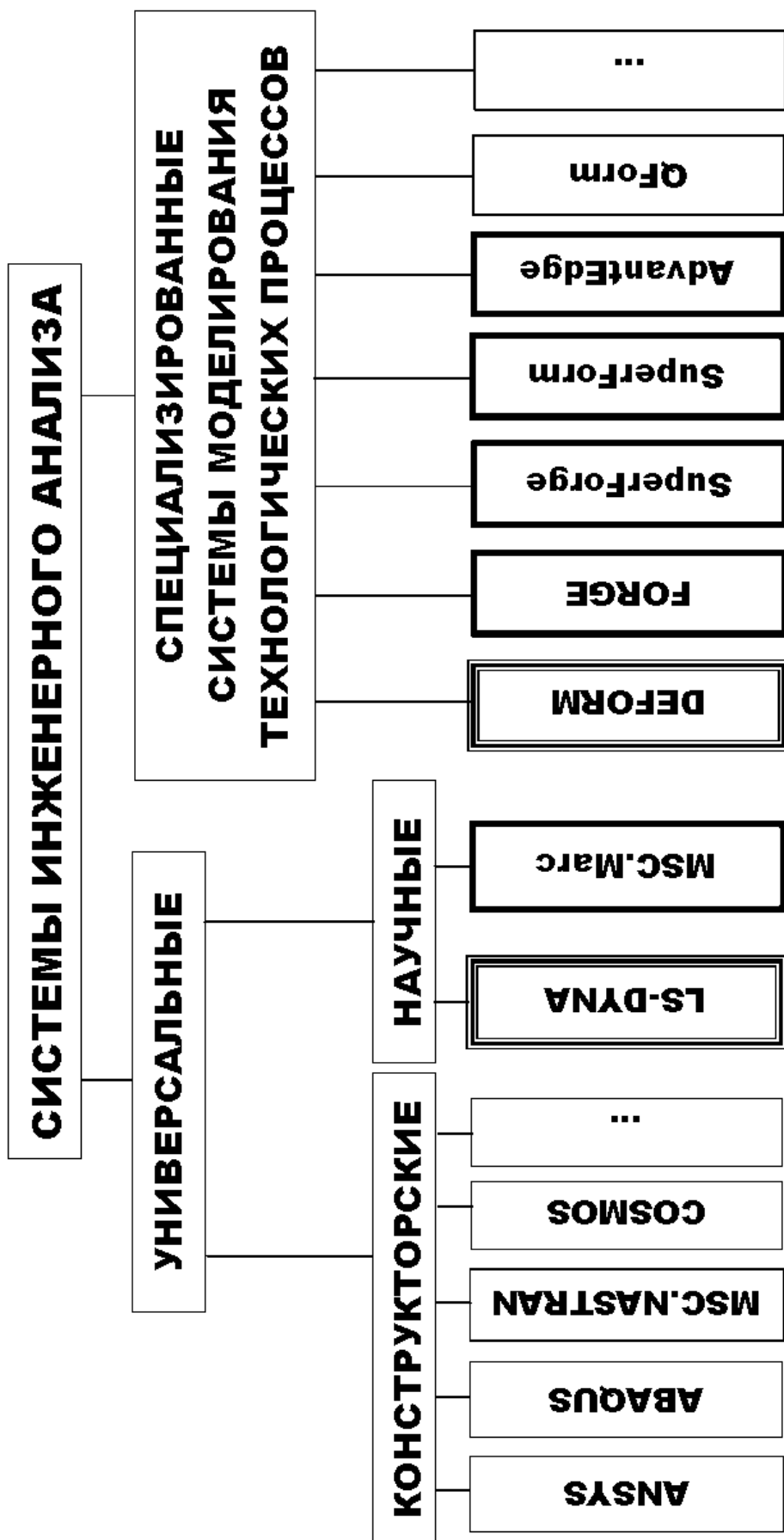


Рис. 1. Классификация систем инженерного анализа, позволяющих моделировать пластическую деформацию твердых тел.

Примером подобного подхода является условие разрушения упруго-пластического материала в LS-DYNA

$$\varepsilon_{eff}^P < \varepsilon_{max}^P,$$

где  $\varepsilon_{eff}^P$  - эквивалентная пластическая деформация;

$\varepsilon_{max}^P$  - максимально допустимая пластическая деформация.

Подобные силовые и деформационные критерии во многих случаях не позволяют получить при моделировании достоверной картины разрушения. В частности, они дают заниженные значения критических напряжений и деформаций при моделировании процессов обработки металлов давлением [1, 2, 4, 5]. Однако с помощью пользовательских подпрограмм в универсальных системах могут быть введены и другие критерии разрушения.

К специализированным программам, позволяющим исследовать пластическую деформацию и разрушение материалов, относят автоматизированные системы моделирования технологических процессов, предназначенные для моделирования технологических процессов машиностроительного производства. К ним относятся DEFORM, FORGE, SuperForm, QForm и др.

Возможности автоматизированных систем моделирования технологических процессов по оценке опасности разрушения заготовки существенно различаются. В таких системах, как QForm, моделирование разрушения вовсе не предусмотрено. Наиболее функциональные автоматизированные системы моделирования технологических процессов, такие как DEFORM, по возможностям моделирования разрушения при пластической деформации существенно превосходят универсальные системы. В них реализовано большое количество критериев разрушения, например таких как нормализованный критерий Кокрофта – Лейтема [4]

$$D = \int \frac{\bar{\sigma}^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon},$$

где  $\bar{\varepsilon}$  - накопленная эквивалентная деформация;

$\bar{\sigma}^*$  - максимальное главное напряжение;

$\bar{\sigma}$  - эквивалентное напряжение по Мизесу;

и критерий Райса – Трейси

$$D = \int e^{\frac{\alpha \sigma_m}{\bar{\sigma}}} d\bar{\varepsilon},$$

где  $\alpha$  - коэффициент, зависящий от свойств материала;

$\sigma_m$  – гидростатическое давление.

Критерии разрушения Кокрофта – Лейтема и Райса – Трейси являются энергетическими и основаны на вычислении потенциальной энергии пластической деформации, т.е. площади фигуры, ограниченной кривой деформация – напряжение (рис. 2). Энергетические критерии позволяют достаточно адекватно оценивать возможность разрушения твердых тел при монотонных процессах пластического деформирования с относительно несложной траекторией дефор-

мации. Они относительно просты и, как правило, не требуют для своего использования проведения каких-либо дополнительных исследований механических свойств материалов. В то же время, в связи с этим они не учитывают ряд важных особенностей поведения материалов при деформировании, например залечивание дефектов, возникающее при смене знаков деформации, что приводит к занижению критических напряжений и деформаций при моделировании немонокотных процессов [1, 2].

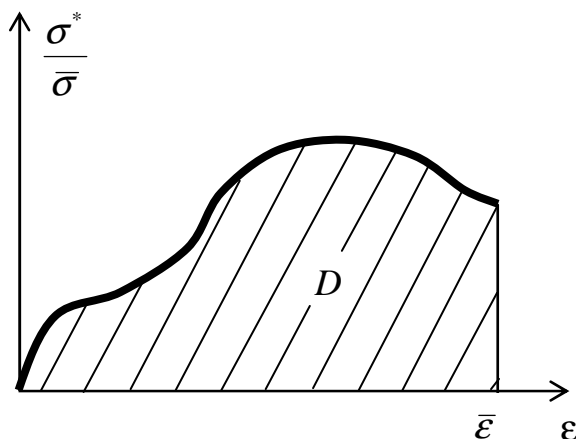


Рис. 2. Нормализованный критерий разрушения Кокрофта – Лейтема.

Для сравнения возможностей универсальных и специализированных систем инженерного анализа по моделированию разрушения металлов при пластической деформации рассмотрим одни из наиболее функциональных систем данных групп, нашедшие в то же время широкое применение в Российской Федерации: LS-DYNA и DEFORM.

Простейшим и, в то же время весьма важным для теории и практики случаем разрушения металлов при пластической деформации являются испытания на растяжение и сжатие. Сравним результаты моделирования в LS-DYNA и DEFORM испытаний на растяжение и сжатие образцов из деформируемого алюминиевого сплава AA 6082-T6 (аналог отечественного сплава АД35 ГОСТ 4784-97).

Модель образца для испытаний на растяжение представляет собой прямоугольный брус размерами 100x100x500 мм. Один конец бруса закреплен неподвижно, а другому захват разрывной машины сообщает скорость 1 м/с. Задача решалась как объемная.

При моделировании в DEFORM 3D V5.1 механические свойства материала образца определялись заданной пользователем мультилинейной кривой упрочнения. В качестве критерия разрушения использовался принятый в системе DEFORM по умолчанию нормализованный критерий Кокрофта – Лейтема, который позволяет достаточно точно предсказывать разрушение поликристаллических металлов и сплавов при монотонной деформации. Критическое значение критерия принято равным 0,28 [3].

На рисунках 3 и 4 приведены полученные при моделировании в DEFORM испытаний на растяжение поля эквивалентных деформаций и распределения

нормализованного критерия Кокрофта – Лейтема перед началом разрушения образца. Разрушение образца по результатам моделирования произошло при его растяжении на 8,2 мм.

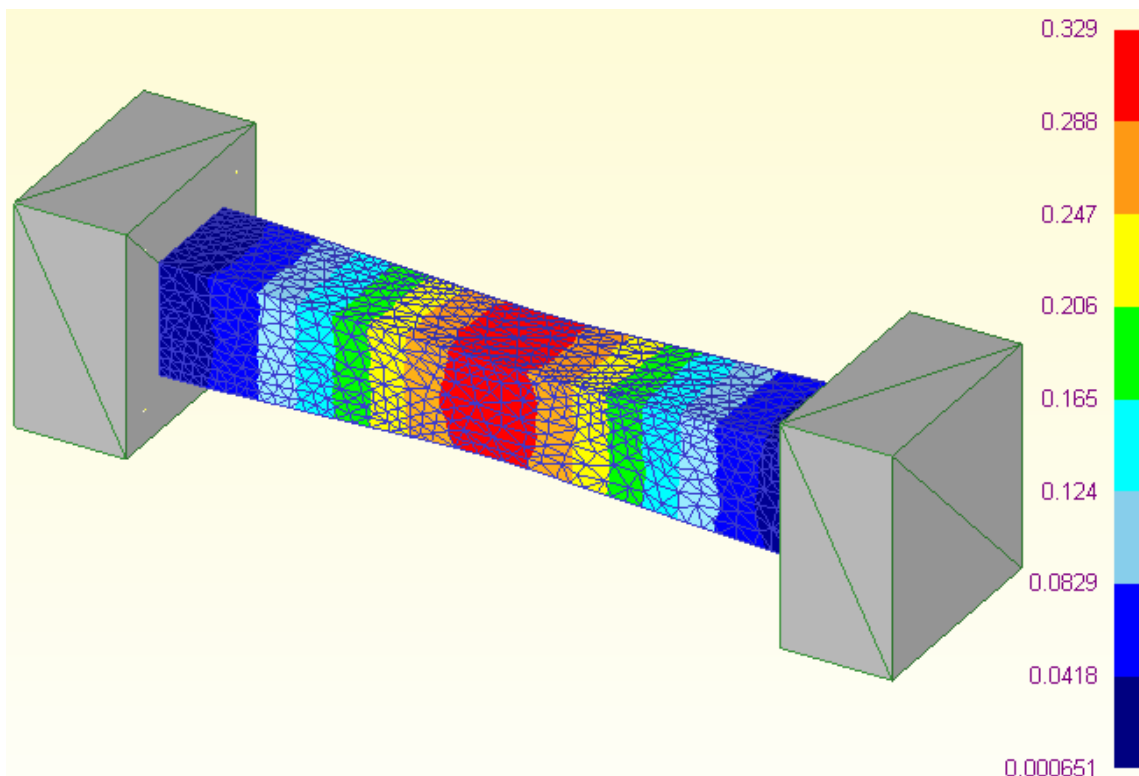


Рис. 3. Эквивалентные деформации при моделировании в DEFORM испытаний на растяжение.

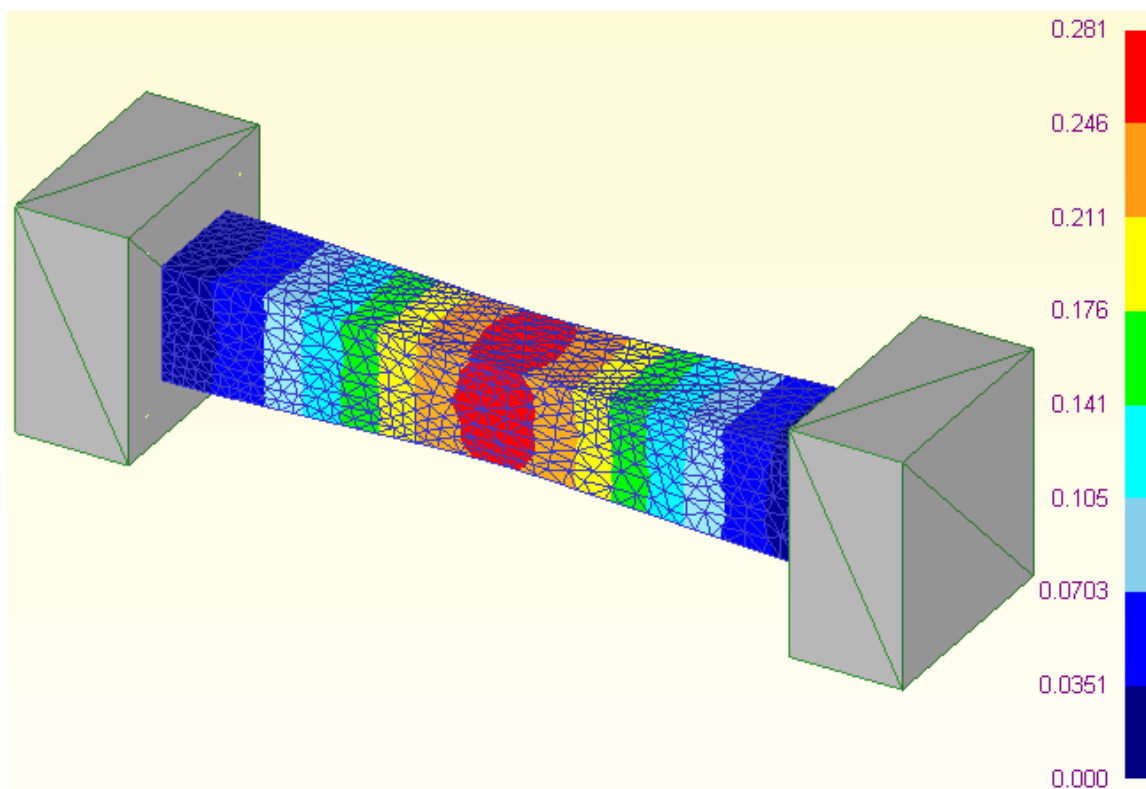


Рис. 4. Распределение нормализованного критерия разрушения Кокрофта - Лейтема при моделировании в DEFORM испытаний на растяжение.

Для сравнения результатов моделирования испытаний на растяжение в DEFORM с результатами аналогичного моделирования в LS-DYNA и натурным экспериментом воспользуемся результатами, полученными Дж. Урбаном (Jerper Urban) [5]. В качестве критерия разрушения при моделировании использовался разработанный им критерий RTCL, представляющий собой комбинацию нормализованного критерия Кокрофта – Лейтема с критерием Райса – Трейси. В LS-DYNA критерий RTCL был реализован с помощью пользовательской подпрограммы. Полученные в результате моделирования поля деформаций и распределения критерия RTCL перед началом разрушения приведены на рисунках 5 и 6. Разрушение образца по результатам моделирования произошло при его растяжении на 8,2 мм.

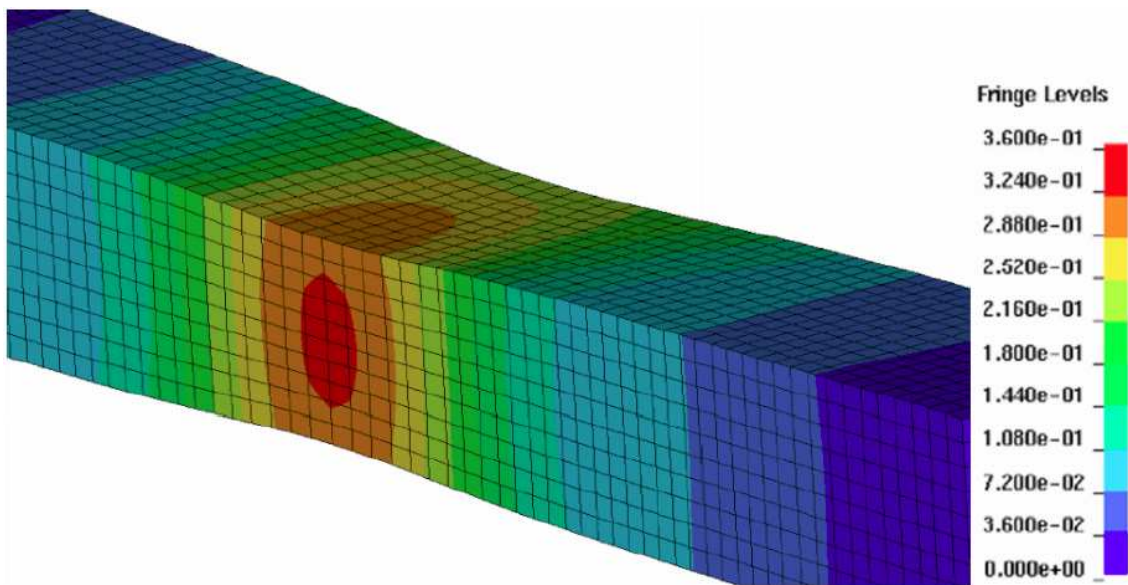


Рис. 5. Эквивалентные деформации при моделировании в LS-DYNA испытаний на растяжение.

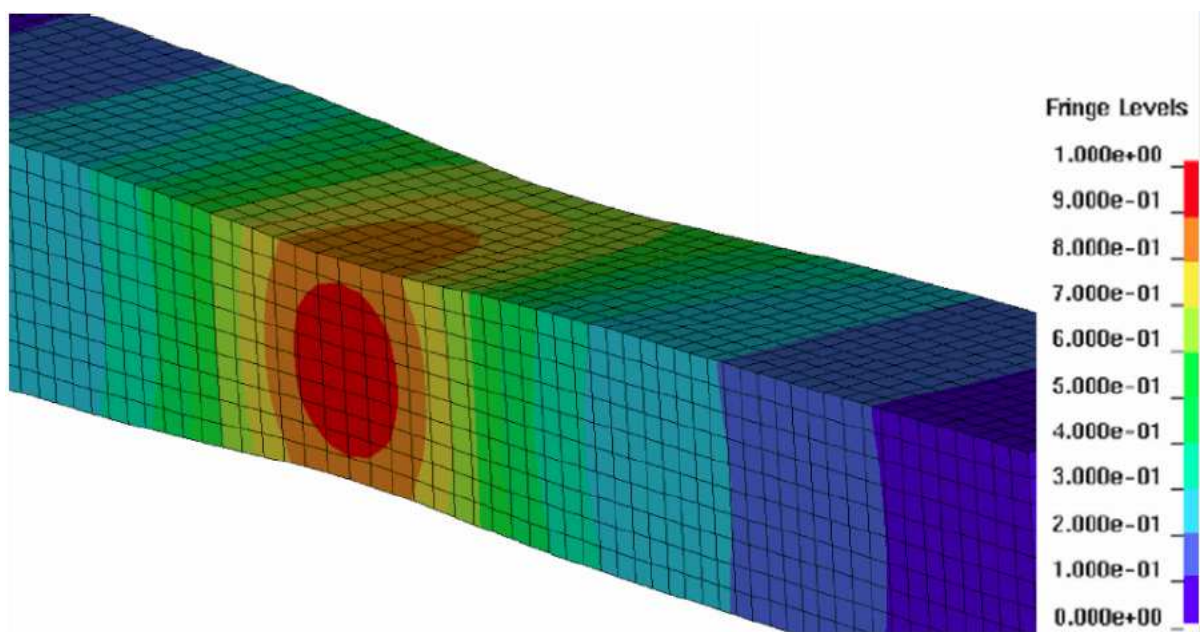


Рис. 6. Распределение критерия разрушения RTCL при моделировании в LS-DYNA испытаний на растяжение.

Результаты натурального эксперимента показали, что разрушение происходит при растяжении образца на 8,4 мм [5].

Образец для испытаний на сжатие представляет собой цилиндр диаметром 10 мм и высотой 10 мм, деформируемый между двумя плоскими инструментами. Коэффициент трения между торцами образца и инструментами равен 0,6 (сталь по алюминию). Один из инструментов является неподвижным, второй деформирует образец со скоростью 1 м/с. Задача решалась как двумерная в осесимметричной постановке.

На рисунках 7 и 8 приведены результаты моделирования в DEFORM 2D V 8.1 испытаний на сжатие после начала разрушения образца. Разрушение образца по результатам моделирования произошло при его сжатии на 5,6 мм.

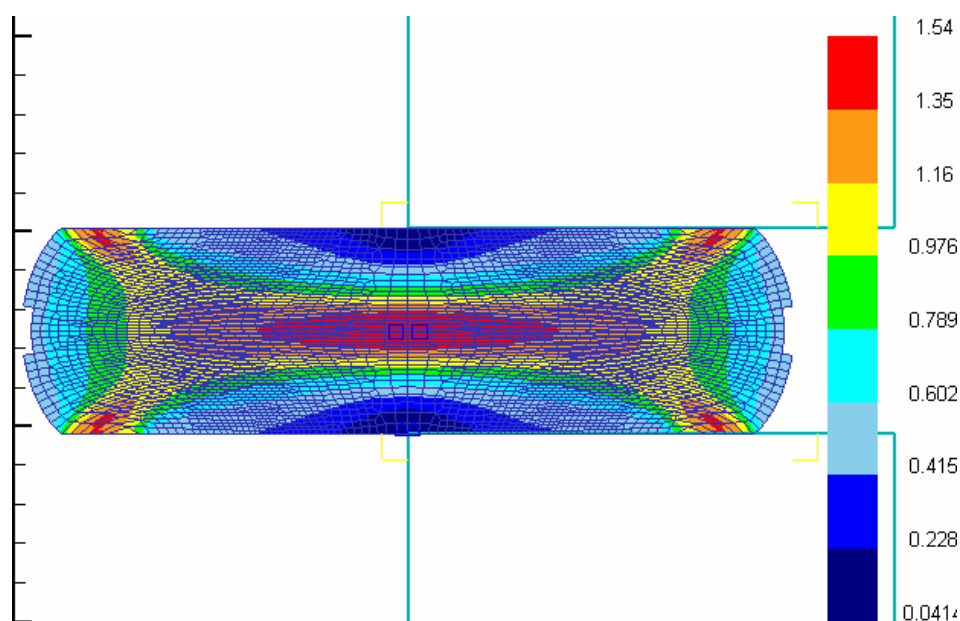


Рис. 7. Эквивалентные деформации при моделировании в DEFORM испытаний на сжатие.

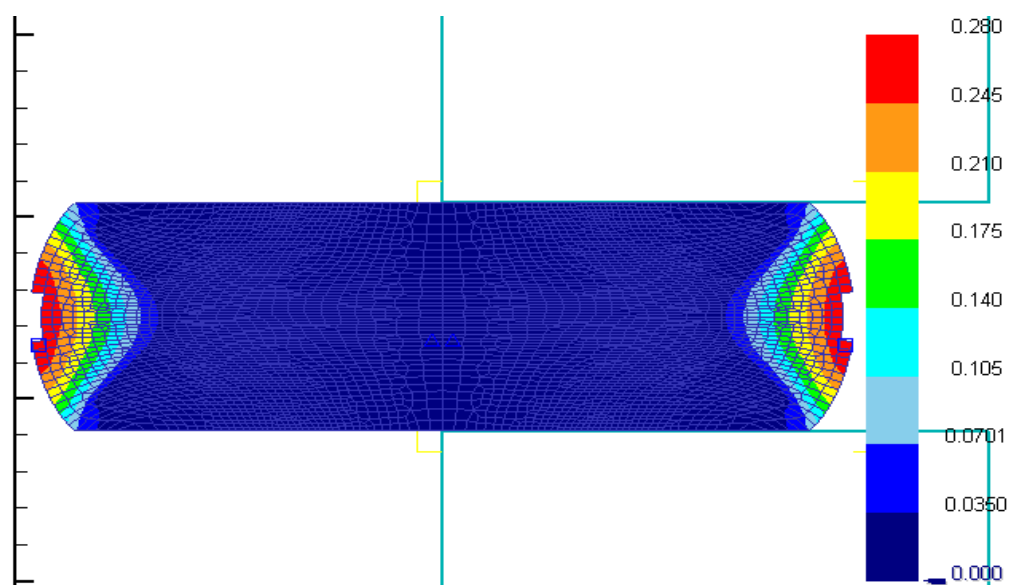


Рис. 8. Распределение нормализованного критерия разрушения Кокрофта – Лейтема при моделировании в DEFORM испытаний на сжатие.

Полученные в результате моделирования испытаний на сжатие в LS-DYNA поля деформаций и критерия RTCL перед началом разрушения [5] приведены на рисунках 9 и 10. Разрушение образца по результатам моделирования произошло при его сжатии на 5,5 мм.

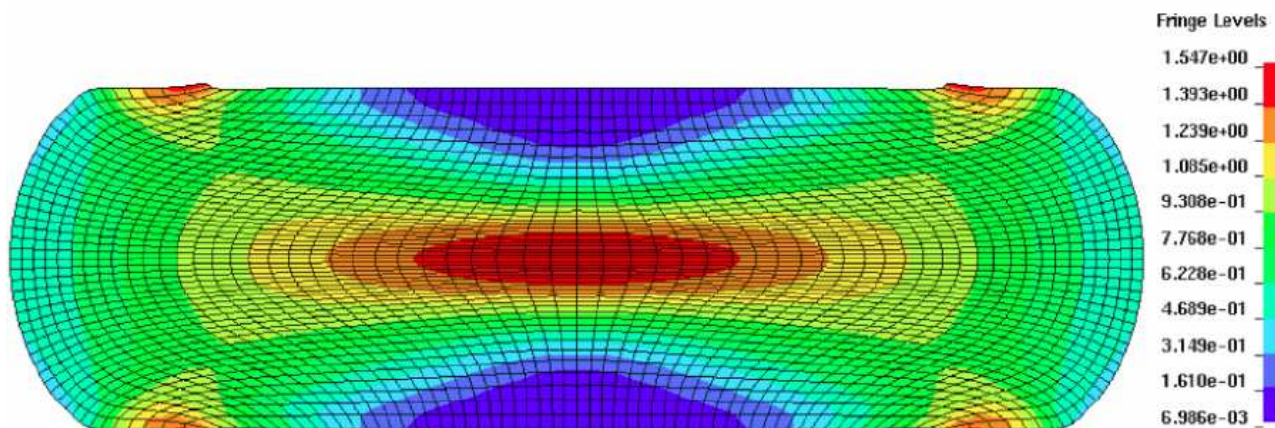


Рис. 9. Эквивалентные деформации при моделировании в LS-DYNA испытаний на сжатие.

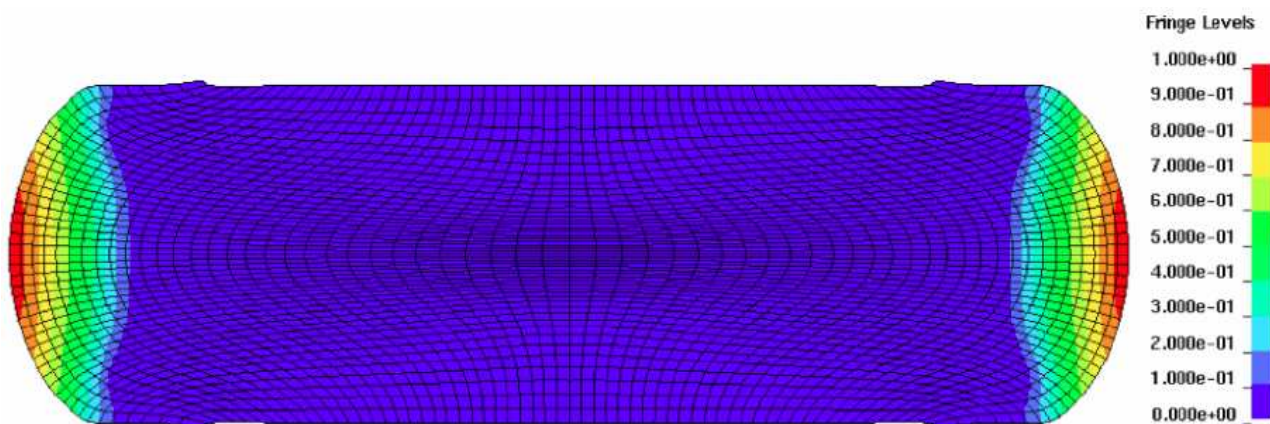


Рис. 10. Распределение критерия разрушения RTCL при моделировании в LS-DYNA испытаний на сжатие.

Результаты натурного эксперимента показали, что разрушение происходит при растяжении образца на 5,7 мм [5].

Сравнение результатов моделирования в DEFORM и LS-DYNA испытаний алюминиевых образцов на растяжение и сжатие с натурными экспериментами показывает, что обе системы позволяют получить вполне приемлемые результаты. Качественная картина разрушения и численная величина деформации, полученные при моделировании, практически полностью совпадают с результатами экспериментальных исследований. При этом встроенные в DEFORM критерии дают возможность достаточно корректно оценивать возможность разрушения твердого тела при монотонной пластической деформации. LS-DYNA для получения достоверной картины разрушения в данных случаях требует использования дополнительных пользовательских подпрограмм [5].



Применение DEFORM позволяет с высокой достоверностью моделировать значительную пластическую деформацию и разрушение изделий в таких технологических процессах обработки давлением и резанием, как штамповка, пресование, точение и т.п., без использования дополнительных пользовательских подпрограмм. Для повышения достоверности моделирования разрушения материалов в сложных немонотонных процессах (прокатка, раскатывание, накатывание и т.п.) пользователь может сам дополнить систему подпрограммой, позволяющей реализовать критерий разрушения, учитывающий особенности данного процесса. К таким критериям можно отнести критерии разрушения, предложенные А.А. Богатовым и Г.Д. Делем [1, 2]. На сегодняшний день DEFORM представляет наибольшие возможности по моделированию значительных пластических деформаций и разрушения твердых тел из всех программных продуктов, представленных на Российском рынке.

Из результатов проведенного сравнения возможностей универсальных систем инженерного анализа и автоматизированных систем моделирования технологических процессов по моделированию разрушения металлов при пластической деформации можно сделать вывод о том, что и те и другие позволяют получать вполне достоверные результаты. Однако применение автоматизированных систем моделирования технологических процессов является предпочтительным, поскольку они имеют более дружелюбный интерфейс. Рассчитанные на использование технологами, не имеющими навыков программирования, эти программные продукты имеют более мощные встроенные инструменты анализа.

## Литература

1. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2002. – 329 с.
2. Дель Г.Д. Технологическая механика. М.: Машиностроение, 1978. – 269 с.
3. Bonora N. Identification and measurement of ductile damage parameters // Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 1999, №34(6). – P. 63-78.
4. Cockroft M.G., Latham D.J. Ductility and the workability of metals // Journal of the Institute of Metals. - 1968, №96. - P. 33-39.
5. Urban J. Crushing and Fracture of Lightweight Structures. PhD Thesis. Technical University of Denmark, 2003. – 242 p.