

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛА В СРЕДЕ СИСТЕМЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ABAQUS

*Разработан алгоритм оценки степени использования ресурса пластичности при моделировании технологических операций, связанных с разрушением заготовки. На примере пробивки листовой заготовки на контурной накладке рассмотрена реализация алгоритма, выполненная для системы конечно-элементного моделирования ABAQUS.*

**Ключевые слова:** ресурс пластичности, диаграмма пластичности, критерий деформируемости, метод конечных элементов, моделирование, листовая штамповка, разделительная операция.

В настоящее время при теоретическом исследовании процессов обработки металлов давлением все чаще используются численные методы анализа напряженно-деформированного состояния заготовки, возникающего в результате выполнения технологических операций. Наибольшее распространение получили программные системы, в основу которых положено использование метода конечных элементов [1–3]. Возможность применения данных систем при анализе процессов обработки металлов давлением (ОМД) связана с универсальностью математических моделей [4], описывающих процессы упругопластического деформирования и допускающих учет таких факторов, как деформационное упрочнение заготовки, особенности трения на контактных поверхностях и т. д., что оказывает существенное влияние на точность определения значений параметров напряженно-деформированного состояния по объему заготовки. Кроме того, использование систем конечно-элементного анализа при моделировании процессов ОМД позволяет осуществлять всестороннее исследование технологических процессов путем изменения базовых параметров модели в широком диапазоне, что не всегда можно реализовать при использовании классических методов анализа.

Однако анализ возможностей универсальных систем конечно-элементного анализа, которые можно применять для исследования процессов ОМД, показал, что подавляющее большинство из них не позволяет в полной мере моделировать выполнение технологических операций, результатом которых является разрушение заготовки в очаге пластической деформации. Это связано с тем, что в рассмотренных системах моделирования реализуются только наиболее общие модели поведения материала под действием нагрузки, а реализация феноменологических критериев оценки деформируемости материала отсутствует.

Вопросами оценки пластичности материала в разное время занималось достаточно большое количество исследователей [5–7]. Как отмечают многие авторы, при холодном пластическом деформировании важнейшим фактором, определяющим пластичность материала, является вид схемы напряженного состояния [6], для численного описания которого используется показатель напряженного состояния  $\Pi$ . Значение показателя  $\Pi$  определяется по формуле [5]

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

Легко заметить, что в случае линейного растяжения  $\Pi = 1$ , в случае линейного сжатия  $\Pi = -1$ , а при кручении и чистом сдвиге  $\Pi = 0$ .

Интенсивность напряжений в общем случае определяется по формуле [8]

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (2)$$

В качестве феноменологического критерия деформируемости материала будем использовать оценку степени истощения ресурса пластичности материала, основой для определения которой является построение диаграммы пластичности [7, 9], представляющая собой функцию вида  $\varepsilon_p = f(\Pi)$ , где  $\varepsilon_p$  – предельная деформация, при которой осуществляется разрушение материала заготовки.

Как отмечается в работе [7], диаграмма пластичности для сталей может быть аппроксимирована экспоненциальной зависимостью вида

$$\varepsilon_p(\Pi) = 2\varepsilon_p^{\Pi=1} e^{-0,72\Pi}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_p^{\Pi=1}$  – предельная деформация, полученная при испытаниях образца на линейное растяжение.

Параметр  $\varepsilon_p^{\Pi=1}$  необходимо определять экспериментально для каждого из материалов, в связи с чем был подготовлен и проведен эксперимент по растяжению образцов (в соответствии с ГОСТ 11701-84) из стали 08кп толщиной  $s = 1,5$  мм, которые растягивались в осевом направлении вплоть до разрушения, а предельная деформация определялась как

$$\varepsilon_p^{\Pi=1} = \ln \frac{b_0}{b_u}, \quad (4)$$

где  $b_0$  – ширина образца до деформирования;  $b_u$  – ширина шейки образца в момент разрушения.

По результатам проведенных экспериментов значение предельной деформации составило  $\varepsilon_p^{\Pi=1} = 0,38$ .

Таким образом, для стали 08кп диаграмма пластичности будет описываться зависимостью следующего вида:

$$\varepsilon_p(\Pi) = 0,76e^{-0,72\Pi}. \quad (5)$$

Оценку степени исчерпания ресурса пластичности необходимо проводить на каждом шаге численного решения, полученного методом конечных элементов. При этом в качестве показателя накопленного использованного ресурса пластичности будем применять критерий Деля-Огородникова в виде [7]

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon_i} n \frac{\varepsilon_i^{n-1}}{\varepsilon_p(\Pi)^n} d\varepsilon_i, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций;

$n$  – коэффициент, учитывающий влияние истории деформирования.

Для определения коэффициента  $n$  необходимо использовать формулу [7]

$$n = 1 + 0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\Pi}{d\varepsilon_i}. \quad (7)$$

Интенсивность деформаций, значение которой входит в формулы (6) и (7), необходимо определять на каждом шаге решения с использованием формулы [8]

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные логарифмические деформации.

Целью работы является разработка и реализация алгоритма анализа использования ресурса пластичности в узлах конечно-элементной сетки при моделировании технологических процессов ОМД, связанных с разделением заготовки, при выполнении анализа с использованием универсальных CAE-систем.

На основе приведенной математической модели был разработан обобщенный алгоритм оценки использования ресурса пластичности (рис. 1). На первом шаге алгоритма осуществляется постановка задачи конечно-элементного анализа, при которой необходимо определить геометрические параметры модели, механические свойства моделируемых материалов и т.д. После этого проводится традиционный расчет поставленной задачи средствами CAE-системы, результатом которого является база данных, содержащая значения параметров напряженно-деформированного состояния элементов модели.

Анализ полученной базы данных позволяет выявить количество шагов  $M$ , за которое было достигнуто решение задачи. Это обеспечивает возможность организации итерационного вычислительного процесса определения степени использования ресурса пластичности  $\Psi$  для всех узлов конечно-элементной сетки на каждом шаге расчета.

На каждой итерации из базы данных для текущего шага расчета выделяются значения главных напряжений и деформаций в каждом из узлов конечно-элементной сетки. По известным значениям напряжений и

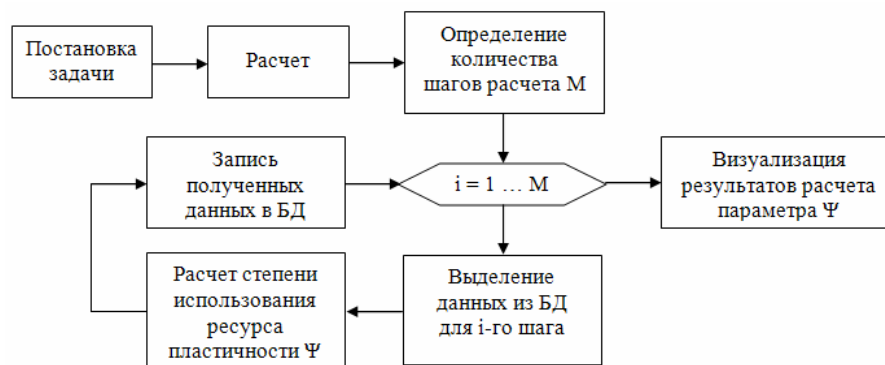


Рис. 1. Обобщенный алгоритм оценки степени использования ресурса пластичности

деформаций согласно изложенной выше методике определяются приращения степени использования ресурса пластичности материала  $d\Psi$  для каждого из узлов конечно-элементной сетки на  $i$ -м шаге численного решения.

Как правило, значения параметров напряженно-деформированного состояния распределены крайне неравномерно по узлам конечно-элементной сетки. В частности, максимальные значения деформаций ассоциированы с узлами, расположенными в очаге пластической деформации. В то же время в модели существуют узлы, для которых значения деформаций на отдельных шагах расчета равны нулю. В этом случае вычисление параметра  $d\Psi$  по зависимостям (6)–(8) не имеет смысла, т.к. ресурс пластичности не используется, в связи с чем полагаем, что параметр  $d\Psi = 0$ .

После вычисления приращений степени использования ресурса пластичности материала  $d\Psi$  для каждого из узлов конечно-элементной сетки определяются значения накопленной степени использования ресурса пластичности, которые дописываются в базу данных. Это делает возможным визуализацию полученных результатов непосредственно средствами САЕ-системы.

Для реализации разработанного алгоритма использовалась универсальная система конечно-элементного анализа ABAQUS, т.к. ядро этой системы содержит интерпретатор языка программирования Python, что делает возможным реализацию программного скрипта, который может быть интегрирован и выполнен непосредственно в среде моделирования. Такой подход обеспечивает совместимость на уровне данных среды моделирования и разработанных программных средств, а также позволяет непосредственно использовать средства визуализации среды ABAQUS для отображения полученных результатов расчета степени использования ресурса пластичности.

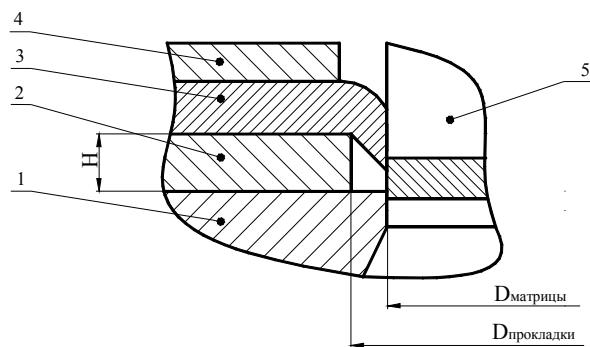


Рис. 2. Схема пробивки листовой заготовки на контурной накладке:

- 1 – матрица; 2 – контурная накладка; 3 – заготовка;  
4 – прижим; 5 – пуансон

В качестве примера рассмотрим моделирование процесса пробивки листовой заготовки на контурной накладке [10]. При проведении расчетов принимались следующие параметры технологического процесса (рис. 2): диаметр матрицы  $D_{\text{матрицы}} = 28$  мм; высота контурной накладки  $H = 1,5$  мм; диаметр отверстия в контурной накладке  $D_{\text{накладки}} = 30,8$  мм; толщина заготовки  $s = 1,5$  мм; материал заготовки – сталь 08кп. Задачу решали в осесимметричной постановке. Рабочий инструмент (пуансон и матрицу) моделировали как абсолютно жесткие недеформируемые тела. Действие прижима на заготовку моделировалось путем определения на части верхней поверхности заготовки граничных условий, которые предотвращают ее перемещение в вертикальном и горизонтальном направлениях. Расчеты выполнялись с учетом упрочнения материала заготовки, характеристики которого были получены в результате экспериментов на линейное растяжение.

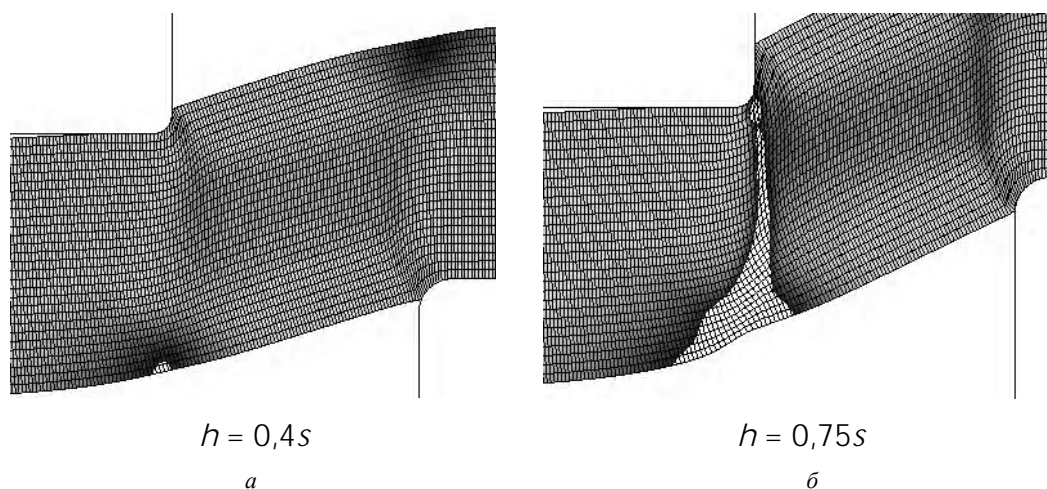


Рис. 3. Распределение степени использования ресурса пластичности в заготовке при различной степени внедрения пуансона:

- а – зарождение трещины; б – разделение заготовки

В результаті виконання численного аналізу параметрів напружено-деформованого стану деформуваної заготовки і наступної обробки отриманих результатів з використанням розробленого програмного забезпечення і ABAQUS, отримано розподіл ступеня використання ресурсу пластичності по товщині заготовки во всіх вузлах кінцево-елементної сітки, отриманої в результаті апроксимації геометрії деталі, яке приведено на рис. 3 при різних значеннях ходу пуансона  $h$ .

Як видно з рис. 3, а, при значенні ходу пуансона  $h = 0,4s$  в зоні заготовки, розташованої в її нижній частині під пуансоном, ресурс пластичності вичерпується. Тому виникнення і розвиток тріщини слід очікувати саме в цій зоні заготовки. При подальшому ході пуансона відбувається вичерпання ресурсу пластичності в вузлах сітки кінцевих елементів, розподілених по товщині заготовки, що призводить до формування тріщини, поширення якої в тілі заготовки призводить до її наступного руйнування (рис. 3, б) при ході пуансона  $h = 0,75s$ .

#### Висновки

1. Аналіз існуючих систем кінцево-елементного аналізу показав, що численні моделі для аналізу напружено-деформованого стану пластично деформуваної заготовки, реалізовані в CAE-системах, не дозволяють контролювати момент їх руйнування.

2. На основі використання феноменологічних критеріїв деформуваності матеріалів розроблено алгоритм оцінки ступеня використання ресурсу пластичності для моделей, описаних кінцево-елементною сіткою, який дозволяє здійснювати контроль деформуваності заготовки при її розрахунку. Представлений алгоритм реалізований у вигляді програмних засобів, інтегрованих в середовище CAE-системи ABAQUS за рахунок використання вбудованого інтер-

претатора мови програмування Python, що забезпечує сумісність розробленого програмного забезпечення і середовища моделювання.

3. Застосування розробленого програмного забезпечення при аналізі процесу пробивки листової заготовки на контурній накладці дозволило встановити зони вичерпання ресурсу пластичності і прогнозувати момент руйнування заготовки.

#### Перелік посилань

1. Манильк Т. Практичне застосування програмного комплексу ABAQUS в інженерних задачах / Т. Манильк, К. Ільїн. – М. : МФТІ, Тесис, 2006. – 67 с.
2. Алямовський А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Інженерний аналіз методом кінцевих елементів / А. А. Алямовський. – М. : ДМК Прес, 2004. – 432 с.
3. Басов К. А. Ansys в прикладах і задачах / К. А. Басов. – М. : Комп'ютерПрес, 2002. – 224 с.
4. Розрахунки машинобудівних конструкцій методом кінцевих елементів : Справочник / [В. І. М'яченков, В. П. Мальцев, В. П. Майборода і др.] ; під заг. ред. В. І. М'яченкова. – М. : Машинобудування, 1989. – 520 с.
5. Смирнов-Аляев Г. А. Механічні основи пластичної обробки металів / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машинобудування, 1968. – 271 с.
6. Зайков М. А. Критерій пластичності при обробці тиском / М. А. Зайков, В. Н. Перетятко // *Вісник вузів*. – 1959. – № 8. – С. 75–86.
7. Огородников В. А. Оцінка деформуваності металів при обробці тиском / В. А. Огородников. – К. : Вища школа, 1983. – 175 с.
8. Сторожев М. В. Теорія обробки металів тиском / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машинобудування, 1977. – 423 с.
9. Огородников В. А. Деформуваність і руйнування металів при пластичній формоізміні / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.
10. Пат. 19856 Україна, МПК В 21 D 28/24. Спосіб одержання отворів з фаскою та підвищеною якістю зрізу / О. Ф. Тарасов, С. О. Короткий. – u 200504655 ; заявл. 18.05.2005 ; опубл. 15.01.07, Бюл. № 1. – 2 с., 1 л. іл.

Одержано 14.10.2009

A. F. Tarasov, S. A. Korotkiy

### MODELLING OF DIVIDING OPERATIONS ON THE BASIS OF DEGREE MATERIAL'S PLASTICITY RESOURCE USE ESTIMATION IN THE ENVIRONMENT OF FINITE-ELEMENT ANALYSIS SYSTEM ABAQUS

*Розроблено алгоритм оцінки ступеня використання ресурсу пластичності при моделюванні технологічних операцій, пов'язаних з руйнуванням заготовки. На прикладі пробивання листової заготовки на контурній накладці розглянута реалізація алгоритму, виконана для системи кінцево-елементного моделювання ABAQUS.*

**Ключові слова:** ресурс пластичності, діаграма пластичності, критерій деформуваності, метод скінчених елементів, моделювання, листовий штамп, розділова операція.

*The algorithm of degree's estimation of the the plasticity resource use at modeling of technological operations, related to blank's destruction, is developed. The realization of algorithm, executed for the system of finite-element design ABAQUS, is considered on the example of sheet blank holing on a contour strap.*

**Key words:** plasticity resource, plasticity diagram, deformability criterion, finite-elements method, modeling, sheet punching, dividing operation.