

TEHNOLOGIES AND MODULATED EQUIPMENT USED FOR OBTAINING COMPOSITE MATERIALS

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СТЕПЕНЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ

Prof. dr. Steblyuk V., PhD Orlyuk M., PhD Holyavik O., eng. Soprunenko V.

Institute of Mechanical Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

Abstract: The paper titled "Limit values of fracture criteria for drawing's processes simulation in the DEFORM environment" pursue the aim of determining the values for fracture criteria for Normalized Cockcroft-Latham and Brozzo within the DEFORM program complex corresponding to the limiting degree of deformation during the drawing of steel 20. According to the full-scale experiment results on an axisymmetric drawing of various diameters blanks 2D and 3D modeling of corresponding processes carried out in the work. A comparative analysis of the experimental data and the results of computer simulation is performed and a technique is proposed for determining the limit values of fracture criteria for modeling. The limit values of the fracture criteria for 2D and 3D modeling are determined (provided that the number of finite elements of the mesh along the thickness of the material in the dangerous section must be at least five). The obtained numerical values for fracture criteria make it possible to predict the behavior of ductile metals in real drawing processes in the future.

KEYWORDS: DRAWING, FRACTURE CRITERIONS, LIMIT VALUE, MODELING, COCKCROFT-LATHAM, BROZZO

1. Введение

С целью оценки возможности изготовления деталей методами пластического деформирования и оптимизации технологических процессов, обеспечивающих качество и эксплуатационную надежность изделий, успешно применяется компьютерное моделирование формоизменяющих операций. Системы моделирования (QForm, DEFORM, FORGE и др.), использующие в расчетах метод конечных элементов (МКЭ), позволяют определить в интересующей точке очага деформации параметры напряженно-деформированного состояния материала в произвольный момент процесса деформирования, рассчитать значение выбранного критерия разрушения для оценки возможности деформирования материала без разрушения. Однако в данных системах отсутствуют методы непосредственного определения принятых в инженерной практике предельных степеней деформации для конкретных операций.

Для оценки возможности разрушения в процессе деформирования при моделировании в DEFORM традиционно используют энергетические критерии разрушения (Normalized Cockcroft-Latham, Cockcroft-Latham, Brozzo, Ayada и др.) [1...3]. Энергетические критерии позволяют достаточно адекватно оценивать возможность разрушения твердых тел при монотонных процессах пластического деформирования с относительно несложной траекторией деформации. Они относительно просты и, как правило, не требуют дополнительных исследований механических свойств материала. При их использовании разрушение материала наступает при достижении критерием критического значения

$$C_p = C_{кр}. \quad (1)$$

При этом главной проблемой для прогнозирования момента разрушения является отсутствие четких рекомендаций по выбору критических значений критериев. А если рекомендации и существуют, то рекомендованные критические значения могут изменяться в широком диапазоне. Так для критерия Normalized Cockcroft-Latham предельные значения находятся в пределах 0,1 ... 0,5 [4, 5] и зависят от схемы напряженного состояния.

Кроме того предельные значения критериев разрушения в большинстве случаев определяются для стандартных механических испытаний образцов, в которых схемы напряженно-деформированного состояния отличаются от схем в реальных операциях.

2. Постановка задачи и решение проблемы

Поэтому для проектирования технологических процессов по результатам компьютерного моделирования необходимо установить связь между значениями критерия разрушения, полученными при моделировании аналогичного процесса, и предельной степенью деформации. Для этого следует сопоставить результаты натурального эксперимента исследуемого технологического процесса, в котором материал был доведен до разрушения или деформировался с максимально возможной степенью деформации, с результатами моделирования данного процесса, которые дадут возможность определить критические значения критерия разрушения.

С той целью проводились эксперименты по вытяжке цилиндрических стаканов из холоднокатаной листовой стали 20 толщиной 2,5 мм. Вытяжка велась в матрицу диаметром 48,25 мм пуансоном диаметром 42,25 мм. Радиус закругления матрицы - 10 мм (4S), пуансона - 5 мм (2S). Усилие прижима фланца колебалось в пределах 4000 ... 5000 Н, изменение степени деформации достигалось изменением диаметра заготовок.

По результатам экспериментов получены диаграммы «усилие-перемещение» (рис. 1) и определена предельная степень вытяжки для заданных условий деформирования.

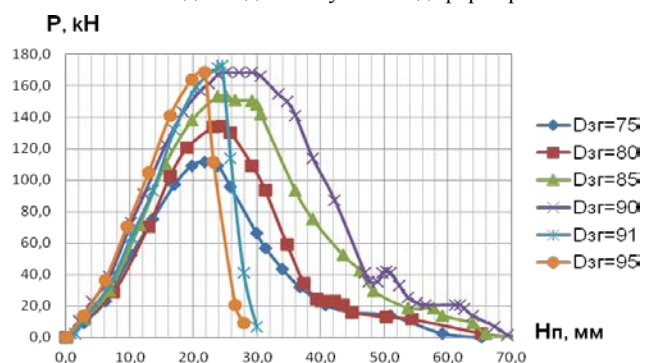


Рис. 1. Диаграммы «усилие-перемещение» вытяжки плоских заготовок из стали 20

Как видно из рисунка, вытяжка заготовки диаметром 90 мм происходит практически при том же усилии, что и разрушение заготовок диаметром 91 и 95 мм (приблизительно при 170 кН). Поэтому по результатам эксперимента максимально допустимая (граничная) степень вытяжки для данных условий деформирования равняется:

$$K = \frac{D_{3z}}{d_{cp}} = \frac{90}{45,75} = 1,97 = K_{cp} \quad (2)$$

На основании полученных экспериментальных данных было проведено компьютерное моделирование процесса вытяжки в среде DEFORM 3D и 2D для заготовок диаметром 90, 91 и 95 мм (для максимально возможной степени деформации и степенях деформации, вызывающих разрушение материала соответственно). Материал заготовки рассматривался как абсолютно пластичный.

По результатам 2D-моделирования вытяжка заготовок диаметром 90 и 91 мм прошла без разрушения, а при вытяжке заготовок диаметром 92 (дополнительный эксперимент) и 95 мм произошло разрушение полуфабриката. Полученные результаты моделирования представлены на рис. 2.

Усилие вытяжки (максимальное) составило 175 ... 177 кН, предельная степень вытяжки по результатам моделирования составила

$$(K_{cp})_{2D} = \frac{D_{3z}}{d_{cp}} = \frac{91}{45,75} = 1,99 \quad (3)$$

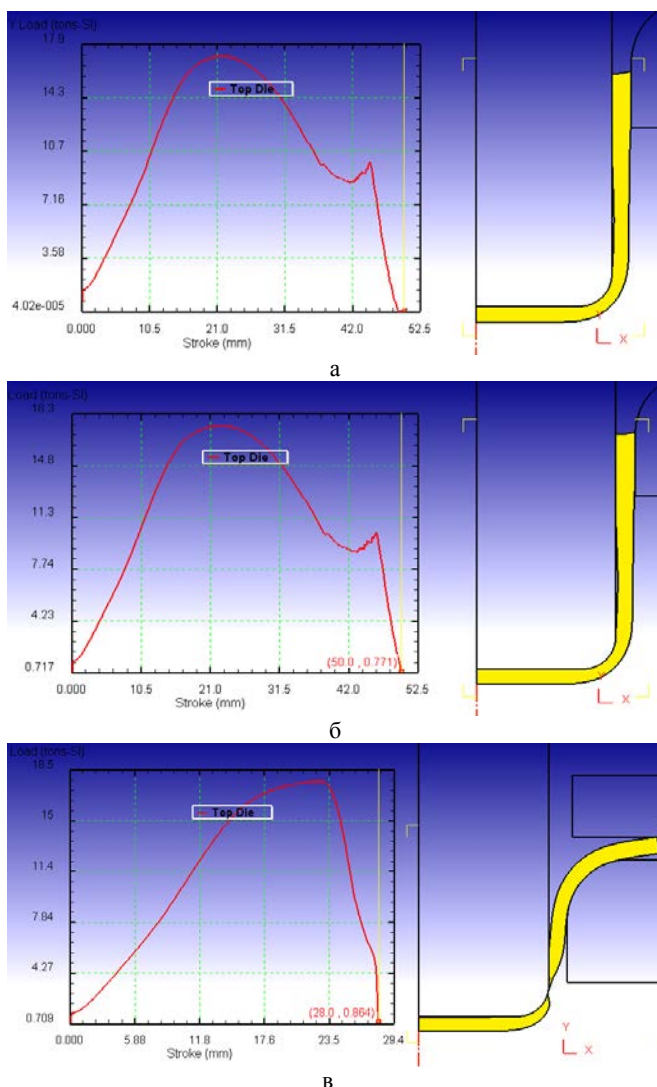


Рис. 2. Результаты 2D-моделирования процесса вытяжки: а) заготовки диаметром 90 мм; б) заготовки диаметром 91 мм; в) заготовки диаметром 92 мм

При 3D-моделировании в месте контакта заготовки с радиусной кромкой пуансона сетка была принудительно уплотнена для увеличения количества элементов в зоне расположения опасного сечения (не менее пяти элементов по толщине) с целью повышения точности результатов. Результаты численного эксперимента практически полностью

совпали с результатами натурального эксперимента (вытяжка заготовки диаметром 90 мм прошла без разрушения, а увеличение диаметра заготовки привело к разрушению полуфабриката).

Диаграммы «усилие-перемещение», полученные по результатам 3D-моделирования, представлены на рис. 3.

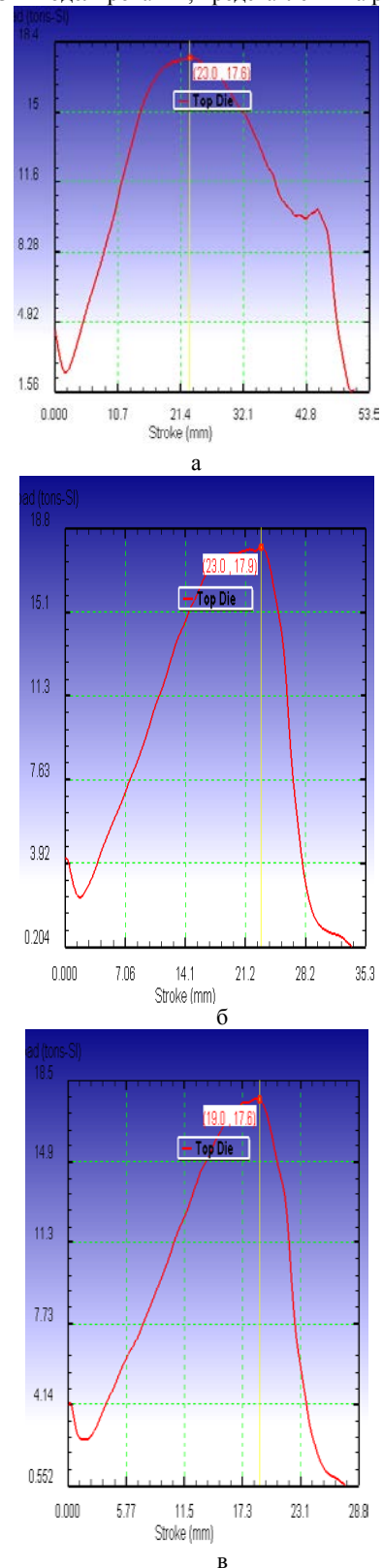


Рис. 3. Диаграммы «усилие-перемещение» по результатам 3D-моделирования процесса вытяжки: а) заготовки диаметром 90 мм; б) заготовки диаметром 91 мм; в) заготовки диаметром 95 мм

Максимальное усилие вытяжки по результатам 3D-моделирования составило 176 ... 179 кН (отклонение от

фактического составляет ~5%), а предельная степень вытяжки совпала с фактической

$$(K_{cp})_{3D} = K_{cp} = 1,97 \quad (4)$$

Существенно отличаются только величины перемещений вытяжного пуансона, которые соответствуют максимуму фактических и полученных моделированием усилий вытяжки. Возможно данное несовпадение можно объяснить тем, что при моделировании материал заготовки рассматривался как абсолютно пластичный.

В дальнейших исследованиях определялись критические значения критериев Normalized Cockcroft-Latham и Brozzo, которые соответствуют предельным степеням деформации и разрушению стали 20 в процессе вытяжки. Данные критерии разрушения были выбраны с учетом того, что при моделировании в DEFORM для оценки вероятности разрушения по умолчанию используется критерий Normalized Cockcroft-Latham, а использование критерия Brozzo рекомендуется для анализа процессов листовой штамповки. Кроме того критические значения критерия Brozzo для процессов ОМД обычно близки к 1, что адекватно воспринимается исследователями, которые используют для оценки возможности разрушения деформационные критерии.

Критерий Cockcroft-Latham основывается на значении энергии деформации на единицу объема. Нормализованный вариант этого критерия (Normalized Cockcroft-Latham, [6]) записывается в виде

$$C = \int \frac{\bar{\sigma}^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}, \quad (5)$$

где $\bar{\epsilon}$ - накопленная пластическая деформация, $d\bar{\epsilon}$ - прирост накопленной деформации, $\bar{\sigma}^*$ - максимальное главное напряжение, $\bar{\sigma}$ - интенсивность напряжений.

Критерий Brozzo [7] устанавливает зависимость разрушения от максимального главного напряжения и гидростатического напряжения (давления)

$$C = \int \frac{2\bar{\sigma}^*}{3(\bar{\sigma}^* - \bar{\sigma}_m)} d\bar{\epsilon}, \quad (6)$$

где $\bar{\sigma}_m$ - гидростатическое напряжение.

Традиционно критические значения критерия разрушения при моделировании определяют на этапе, который соответствует моменту фактического разрушения материала при натурном эксперименте. В нашем случае при вытяжке заготовки диаметром 91 мм разрушения произошло на перемещении пуансона 24,5 мм, заготовки диаметром 95 мм - на перемещении 21,8 мм. Эти перемещения соответствуют максимуму соответствующих «Р-Н»-диаграмм (рис. 1).

Картини распределения значений критериев разрушения в момент разрушения заготовок диаметром 91 и 95 мм по результатам 3D-моделирования представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Как видно из рис. 4, критическое значение, при котором происходит разрушение заготовки диаметром 91 мм, для критерия Normalized Cockcroft-Latham составляет 1...1,05, для критерия Brozzo - 1,25...1,3. При вытяжке заготовки диаметром 95 мм критическое значение критерия Normalized Cockcroft-Latham находится в пределах 1,35...1,4, Brozzo - 1,5...1,55 (рис. 5).

Полученные значения в первом и втором случае существенно отличаются, хотя по логике должны быть одинаковыми. Одним из объяснений такого несоответствия может быть неточность в определении момента, соответствующего разрушению и значительная деформация элементов сетки в зоне расположения опасного сечения. Поэтому такой подход для определения критических значений

критерия разрушения можно рекомендовать только при условии точной фиксации момента разрушения заготовки.

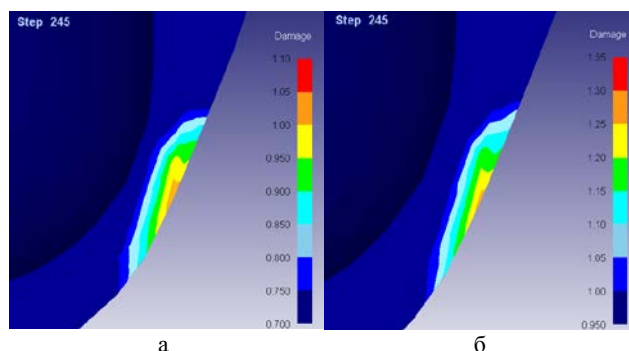


Рис. 4. Распределение значений критериев разрушения в момент разрушения заготовки диаметром 91 мм:
а) Normalized Cockcroft-Latham; б) Brozzo

При деформировании пластических материалов разрушению материала предшествует стадия локализации пластической деформации (при испытании на растяжение в образцах перед разрушением образуется шейка). Поэтому с технологической точки зрения важнее спрогнозировать момент начала разрушения (момент начала локализации деформации), а не момент самого разрушения, или установить предельные параметры процесса, при которых деформирование происходит без разрушения.

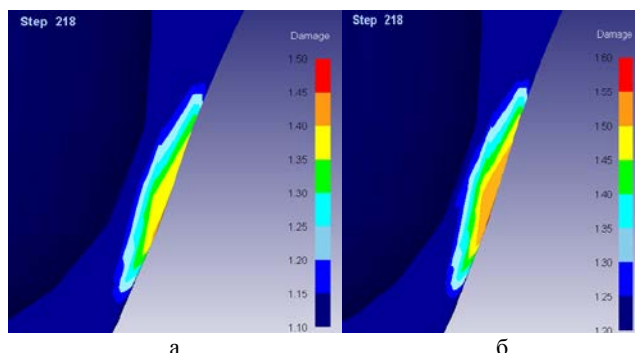


Рис. 5. Распределение значений критериев разрушения в момент разрушения заготовки диаметром 95 мм:
а) Normalized Cockcroft-Latham; б) Brozzo

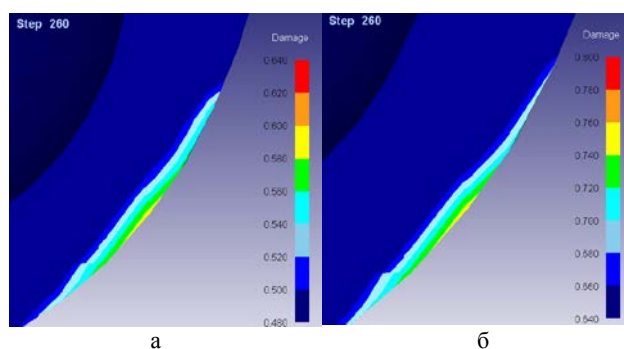


Рис. 6. Распределение предельных значений критериев разрушения при вытяжке заготовки диаметром 90 мм:
а) Normalized Cockcroft-Latham; б) Brozzo

В нашем случае без разрушения происходит вытяжка заготовки диаметром 90 мм при значениях критерия Normalized Cockcroft-Latham 0,58...0,6 (рис. 6а), Brozzo - 0,74...0,76 (рис. 6б).

При вытяжке заготовки диаметром 91 мм локализация деформации начинается на 228 шаге моделирования (рис. 7). Для данного шага среднее значение критерия Normalized Cockcroft-Latham колеблется в пределах 0,64...0,68 (рис. 8а), критерия Brozzo - 0,82...0,86 (рис. 8б).

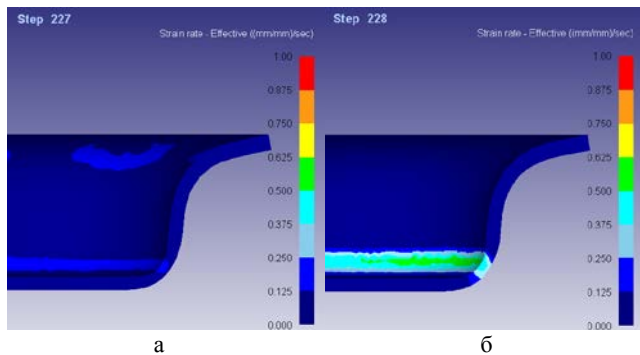


Рис. 7. Распределение интенсивности скорости деформации при вытяжке заготовки диаметром 91 мм

При вытяжке заготовки диаметром 95 мм среднее значение критерия Normalized Cockcroft-Latham в момент начала локализации деформации находится в пределах 0,58...0,62, критерия Brozzo - 0,77...0,79.

Анализируя полученные результаты 3D-моделирования, можно сделать вывод, что реальный процесс вытяжки будет протекать без разрушения, если при моделировании расчетные значения критерия разрушения Normalized Cockcroft-Latham не превышают 0,6, критерия Brozzo - 0,75. Если рассчитанные значения соответствующих критериев превышают указанные величины, вероятность разрушения резко возрастает.

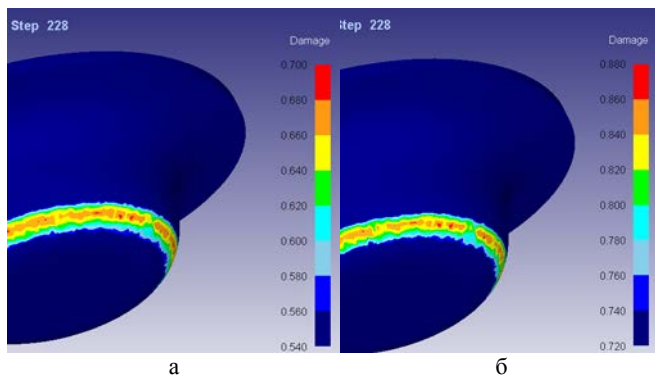


Рис. 8. Распределение значений критериев разрушения при вытяжке заготовки диаметром 91 мм в момент локализации деформации: а) Normalized Cockcroft-Latham; б) Brozzo

Также по результатам численных экспериментов установлено, что при моделировании в DEFORM 2D предельные значения критерия Normalized Cockcroft-Latham находятся в пределах 0,5 ... 0,55, критерия Brozzo - 0,65 ... 0,7.

3. Выводы

В статье проведен сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования процесса вытяжки цилиндрического стакана из стали 20 с целью определения предельных критериев разрушения. Полученные числовые значения критериев

Normalized Cockcroft-Latham и Brozzo позволяют по результатам моделирования прогнозировать поведение пластичных металлов и определять допустимые степени вытяжки в реальных процессах. Критические значения данных критериев могут быть использованы при проектировании технологических процессов формовки.

Полученные результаты были успешно использованы для оптимизации формы предварительно профилированных заготовок, создающих резерв прочности опасного сечения для интенсификации вытяжки полых цилиндрических изделий с большой разницей толщины стенок и дна [8].

Использованная литература:

1. Харсеев В.Е. Макроскопические феноменологические модели и теории разрушения обработки металлов давлением / В.Е. Харсеев // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 3 (36). – С. 90 – 96.
2. Барышников М.П. К вопросу выбора критериев разрушения при математическом моделировании процессов обработки давлением в современных программных комплексах. / Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б., Ильина Н.Н. // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2014. – № 1 (40). – С. 48 – 55.
3. Guntram Ruf. Modeling ductile damage of a Ni-base alloy considering the microstructure evolution during hot working. / Guntram Ruf, Christof Sommitsch, Bruno Buchmayr. // Steel Grips. Journal of Steel and Related Materials. – 2006. – № 4. – S. 56 – 63.
4. Бень І.В. Вплив параметрів сітки скінчених елементів при моделюванні процесу вирубвання деталей в середовищі DEFORM 3D / Бень І.В., Орлюк М.В. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2015. - № 47(1166) - С. 11 – 14.
5. А.А. Уманский. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния металла при сортовой прокатке. / А.А. Уманский. В.Н. Кадыков, Ю.А. Мартянов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 4 (6) – С. 8 – 11.
6. Cockroft, M.G. & Latham, D.J. (1968). Ductility and workability of metals, L Inst. Metals. – Vol. 96. – P. 33–39.
7. Brozzo, P., Deluca, B. and Rendina, R. A new method for the prediction of formability limits of metal sheets, Proceedings of the 7th biennial congress in International Deep Drawing Research Group, 1972, p. 3.1/3.5.
8. Орлюк М.В. Інтенсифікація витягування порожнистих тонкостінних виробів з використанням профільованих заготовок : дис... канд. техн. наук: 05.03.05 / Орлюк Михайло Володимирович; Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". - К., 2005. - 196 арк.