

УДК 621.7.011:620.191.3

DOI 10.18698/0536-1044-2017-8-8-17

Реализация модели Гурсо–Твергарда–Нидельмана для расчета процессов холодной объемной штамповки несжимаемых материалов

А.В. Власов¹, Д.А. Герасимов²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² ООО «КванторФорм», 115088, Москва, Российская Федерация, а/я 74

The Implementation of the Gurson–Tvergaard–Needleman Model for Simulation of Cold Forging Processes of Incompressible Materials

A.V. Vlasov¹, D.A. Gerasimov²

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² ООО QuantorForm, 115088, Moscow, Russian Federation, P. O. Box 74



e-mail: anvvlasov@mail.ru, gerasimov@qform3d.com

i Прогнозирование разрушения заготовки в процессе обработки давлением необходимо для проектирования технологических процессов холодной объемной штамповки. В программных комплексах общего назначения (LS-DYNA, ABAQUS) для расчета поврежденности металла широко используют микромеханическую модель Гурсо–Твергарда–Нидельмана. Однако по ряду причин такие комплексы редко применяют для расчета технологических операций объемной штамповки. Реализации этой модели в специализированных программах для моделирования процессов объемной штамповки препятствует условие постоянства объема, содержащееся в разрешающей системе уравнений. Предложен подход, позволяющий учитывать изменение сопротивления деформирования металла, в зависимости от прогнозируемой приведенной пористости по модели Гурсо–Твергарда–Нидельмана при моделировании с учетом допущения о несжимаемости материала. Методика реализована в виде подпрограммы для отечественного комплекса QForm, широко используемого при технологических расчетах процессов объемной штамповки, прокатки, волочения и прессования. Выполнена верификация модели путем сравнения с результатами расчета в программе LS-DYNA.

Ключевые слова: модель Гурсо–Твергарда–Нидельмана, холодная объемная штамповка, несжимаемый материал, вязкое разрушение, зарождение микропор, рост микропор

i Prediction of workpiece fracture during metal forming operations is necessary for designing technological processes of cold forging. The micromechanical Gurson–Tvergaard–Needleman model is widely used in general purpose software systems (LS-DYNA, ABAQUS) to calculate metal fracture. However, these systems are rarely used for simulation of forging technological operations for a number of reasons. The incompressibility condition contained in the resolving system of equations prevents the implementation of this model in specialized programs for simulating forging processes. This article proposes an approach that takes into account the change in metal deformation resistance depending on the predicted porosity derived from the Gurson–Tvergaard–Needleman model and allowing for the incompressibility of the material. The method is implemented as a subroutine for QForm Russian software, widely used for

simulation of forging, rolling, drawing and pressing. Model validation is performed by comparing it with the results of the calculations in LS-DYNA.

Keywords: Gurson–Tvergaard–Needleman model, cold forging, incompressible material, viscous fracture, microvoid nucleation, microvoid growth

Процессы холодной объемной штамповки часто ограничены разрушением материала при больших пластических деформациях (ПД). Обычно для описания таких процессов используют термин «вязкое разрушение». В работах отечественных и зарубежных ученых предложено большое количество как феноменологических, так и микромеханических критериев вязкого разрушения [1]. Как правило, предлагаемые критерии показывают достаточную для практики точность на некотором круге задач.

Одной из моделей, имеющих микромеханическую природу, является модель Гурсо, в которой процесс вязкого разрушения описывается совокупностью процессов зарождения, роста и коалесценции микропор. К достоинствам модели Гурсо относится возможность физической интерпретации параметра поврежденности. Модель Гурсо включена в состав программных комплексов общего назначения, таких как LS-DYNA, ABAQUS и др. Однако эти комплексы редко используют при практических расчетах процессов холодной объемной штамповки вследствие проблем с адаптацией сетки конечных элементов, адекватного воспроизведения особенностей трения при ПД, отсутствия баз данных свойств материалов и др. Среди специализированных комплексов можно выделить отечественную разработку — программный комплекс QForm, который широко применяют в России и за рубежом [2].

Цель работы — включение в состав программного комплекса QForm стандартной модели Гурсо–Твергарда–Нидельмана и ее верификация на тестовых задачах.

Модель Гурсо–Твергарда–Нидельмана (Gurson–Tvergaard–Needleman — GTN). Уравнение поверхности пластичности получено А. Гурсо [3] путем решения задачи о сферически симметричном деформировании сферической поры в идеальном жесткопластическом материале:

$$\Phi = \left(\frac{\bar{\sigma}}{Y_0}\right)^2 + 2f \cosh\left(\frac{3\sigma_m}{2Y_0}\right) - (1 + f^2) = 0.$$

Здесь Φ — пластический потенциал; $\bar{\sigma}$ — эффективное (эквивалентное) напряжение представительного объема; Y_0 — предел текучести

материала основы; f — относительная пористость; σ_m — среднее напряжение, $\sigma_m = \sigma_{ii}/3$.

Эквивалентное напряжение представительного объема

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}\right)^{1/2},$$

где σ'_{ij} — девиатор тензора напряжений представительного объема пористого материала, $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}$ (δ_{ij} — символ Кронекера).

В. Твергард в работе [4] ввел в это условие константы q_1, q_2, q_3 для согласования результатов численного моделирования деформации материала с периодическими порами. В дальнейшем [5] условие пластичности Гурсо–Твергарда использовали для упрочняющегося материала, заменив предел текучести сопротивлением металла пластическому деформированию σ_s — функцией накопленной ПД материала основы $\bar{\epsilon}_M^p$:

$$Y_0 = \sigma_s \left(\bar{\epsilon}_M^p\right).$$

Для учета слияния пор В. Твергард и А. Нидельман [6] предложили использовать в условии пластичности Гурсо эквивалентную пористость f^* , вычисляемую по следующему алгоритму

$$f^* = \begin{cases} f, & f < f_c; \\ f_c + \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c), & f > f_c, \end{cases}$$

где f_c — критическая пористость, до которой поры не взаимодействуют; f_u^* — предельная пористость, $f_u^* = (q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3})/q_3$ при $f = f_F$; f_F — пористость, соответствующая разрушению.

Таким образом, условие пластичности в модели GTN имеет вид

$$\Phi = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{sM}}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2\sigma_{sM}}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0, \quad (1)$$

где σ_{sM} — сопротивление деформации материала основы.

Предполагаем, что в начальный момент деформирования в недеформированном материале

ле уже содержатся поры, некоторое начальное значение которых равно f_0 .

Скорость изменения пористости определяется суммой скоростей зарождения \dot{f}_{Nuc} и роста микропор \dot{f}_{Gr} :

$$\dot{f} = \dot{f}_{Nuc} + \dot{f}_{Gr}. \quad (2)$$

Скорость роста пор зависит от скорости объемной деформации $\dot{\epsilon}_v^p$:

$$\dot{f}_{Gr} = (1-f)\dot{\epsilon}_v^p.$$

Скорость зарождения микропор пропорциональна эквивалентной скорости ПД и подчиняется нормальному распределению

$$\dot{f}_{Nuc} = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\epsilon}_M^p - \epsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] \dot{\epsilon}_M^p,$$

где f_N — доля объема возникающих пор; S_N — стандартное отклонение распределения Гаусса; ϵ_N — эквивалентная ПД, соответствующая максимальной скорости зарождения пор.

Таким образом, модель GTN базируется на девяти параметрах ($q_1, q_2, q_3, f_0, f_c, f_F, f_N, \epsilon_N, S_N$), которые определяются путем микроструктурных исследований и инверсным анализом.

Модели материала типа GTN использовали при расчете в различных программных продуктах. В программе LS-DYNA материал MAT_GURSON добавлен в стандартную библиотеку материалов.

Модель GTN с расширением Хуе вошла в состав программы Forge в докторской диссертации Trong Son Cao [7]. Там же приведен алгоритм расчета на основе упругопластической модели материала.

Существуют многочисленные примеры [8–11] реализации модели GTN в программе ABAQUS путем создания материала пользователя на базе его упругопластической модели. В работах М. Запара [11, 12] предложено расширение модели GTN для учета образования пор от разрушения микровключений MnS в стали 20MnCr5 (DIN 1.7147, ГОСТ 18ХГ) в целях создания пользовательской модели материала в ABAQUS.

В статье [13] приведены примеры включения пользовательской модели GTN материала в состав программы DEFORM, также базирующейся на вязкопластической модели материала. Основная идея этих работ — использование квадратичного разложения гиперболического косинуса в точке, соответствующей нулевому

значению средних напряжений, и использование стандартной модели пористого материала. Как показали наши расчеты, такое разложение дает хорошее приближение при абсолютных значениях параметра многоосности (stress triaxiality — отношение среднего напряжения к интенсивности напряжений), меньших 0,5. При увеличении параметра triaxiality ошибка аппроксимации резко возрастает.

Базовой в программе QForm является вязкопластическая модель материала, поэтому использовать приведенные в технической литературе алгоритмы для упругопластического материала не представляется возможным. Применение подхода, основанного на квадратичном разложении гиперболического косинуса в начальной точке для процессов холодной штамповки, даст большую ошибку, поскольку параметр triaxiality по абсолютному значению обычно превышает 0,5 в очаге ПД. В настоящей статье для реализации модели GTN в программном комплексе QForm предлагается использовать подход, базирующийся на оценке объемных деформаций вязкопластического тела по значению накопленных ПД [14, 15].

Особенности реализации модели GTN в программе QForm. Из уравнения (2) следует, что эволюция поврежденности состоит из роста пор вследствие объемной ПД и зарождения пустот из-за девиатора ПД. Объемная часть скорости ПД будет отлична от нуля до тех пор, пока существует объем пор и, следовательно, поврежденность. Рост пор происходит при положительном значении среднего напряжения, а их уменьшение при отрицательном. Несмотря на то что исходное уравнение базируется на пластическом потенциале, модель Гурсо в своем определении нарушает допущение постоянства объема, которое является общим в классической теории пластичности. Этот факт является основным препятствием для включения модели Гурсо в состав программного комплекса QForm, поскольку базовая формулировка основных уравнений для анализа ПД содержит закон постоянства объема. В комплексе QForm также можно моделировать пористые материалы, однако в этом случае используют условие пластичности Грина, причем функции пористости не допускают изменение пользователем.

Как показали экспериментальные исследования Сао [7], появление трещин ассоциируется

с относительной пористостью около 1 %. В этом случае изменение объема представительного объема деформируемого материала вследствие образования и роста пор незначительно и для практических расчетов им можно пренебречь. Такое допущение позволяет рассматривать объемную пористость не как микромеханическую, а как феноменологическую характеристику, оценивающую степень поврежденности материала.

Влияние объемной пористости на изменение сопротивления деформированию представительного объема материала можно оценить коэффициентом k_f , зависящим также от среднего напряжения. Этот коэффициент определяется из уравнения (1), если принять, что представительный объем подчиняется условию пластичности Мизеса:

$$\bar{\sigma} = \sigma_s.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \sigma_{sM} k_f = \\ &= \sigma_{sM} \sqrt{(1 + q_3 f^2) - 2q_1 f \cosh\left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2\sigma_{sM}}\right)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для реализации предложенной концепции необходимо определить объемную пористость по результатам моделирования несжимаемого материала. С этой целью используем подход, предложенный в работах [14, 15] и позволяющий оценить объемные деформации по значению накопленных ПД. Далее приведено его краткое обоснование с использованием принятых обозначений.

Ассоциированный закон течения включает в себя объемную и девиаторную части:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij}'^p + \delta_{ij} \dot{\varepsilon}_v^p = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}},$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ и $\dot{\varepsilon}_{ij}'^p$ — компоненты тензора и девиатора скоростей ПД; $\dot{\varepsilon}_v^p$ — скорость объемных ПД (за счет изменения объема пор); $\dot{\lambda}$ — пластический множитель.

Интенсивность скоростей ПД можно представить в виде

$$\bar{\varepsilon}^p = \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}'^p \dot{\varepsilon}_{ij}'^p \right)^{1/2} = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \bar{\sigma}}.$$

Скорость объемных ПД определяется соотношением

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_m}.$$

Исключив из этого выражения пластический множитель, получим

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \bar{\varepsilon}^p \frac{\partial \Phi / \partial \sigma_m}{\partial \Phi / \partial \bar{\sigma}}.$$

Используя уравнение поверхности пластичности (1) как пластический потенциал и выполнив дифференцирование, окончательно имеем [14]

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \bar{\varepsilon}^p \frac{3q_1 q_2 \sigma_{sM} f^* \sinh\left(\frac{3q_2 \sigma_m}{\sigma_{sM}}\right)}{2\bar{\sigma}}. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет оценить приращение объемной ПД в модели Гурсо с помощью модели несжимаемого материала.

Теория ПД некомпактных сред дает возможность получить уравнение для определения скорости ПД основы, значение которой необходимо для вычисления сопротивления деформации материала основы. Удельная мощность ПД представительного объема зависит от удельной мощности деформации основы (без учета пор) и объемной доли пор согласно известному выражению

$$\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} = (1 - f) \sigma_{sM} \bar{\varepsilon}_M^p.$$

Отсюда скорость ПД основы

$$\bar{\varepsilon}_M^p = \frac{\bar{\sigma} \bar{\varepsilon}^p + \sigma_m \dot{\varepsilon}_v^p}{(1 - f) \sigma_{sM}}. \quad (5)$$

Объемная доля пор и накопленная ПД основы определяются численным интегрированием:

$$\begin{aligned} f &= \int_t \dot{f} dt; \\ \varepsilon_M^p &= \int_t \bar{\varepsilon}_M^p dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Сопротивление деформации материала основы, зависящее от накопленной ПД, скорости ПД и температуры, можно найти из базы данных материалов по зависимости

$$\sigma_{sM} = \sigma(\varepsilon_M^p, \bar{\varepsilon}_M^p, T). \quad (7)$$

Уравнения (2)–(7) представляют собой систему нелинейных уравнений, решение которых позволяет определить коэффициент коррекции значения сопротивления деформированию согласно модели Гурсо по результатам моделирования несжимаемой среды. Как показали численные эксперименты, для решения системы уравнений (2)–(7) достаточно трех простых итераций при использовании шага расчета по умолчанию в программном ком-

плексе QForm. Для реализации алгоритма расчета на языке Lua (<http://www.lua.org>) создана и включена в библиотеку комплекса QForm подпрограмма определения сопротивления деформированию материала на базе модели GTN.

Верификация модели в программном комплексе QForm. Верификацию модели материала проводили путем сравнения результатов моделирования тестовых задач в программном комплексе QForm и программе LS-DYNA с использованием стандартной модели материала MAT_GURSON. В отличие от программы QForm, в которой реализована вязкопластическая модель деформируемого несжимаемого материала, программа LS-DYNA воспроизводит упругопластическое поведение материала с учетом изменения объема за счет возникновения и роста пор.

По рекомендациям М. Запара [11, 12] приняты следующие параметры модели Гурсо для стали 20MnCr5:

$$q_1 = 1 = q_2 = q_3; \quad f_0 = 5 \cdot 10^{-5}; \quad f_N = 0,01; \\ \varepsilon_N = 0,5; \quad S_N = 0,4.$$

В качестве тестовых задач использовали опыты на растяжение и сжатие (осадку) заготовок с фасонной поверхностью. Форму и размеры образцов принимали согласно работе [12]. Сопротивление деформации материала основы, определенное в работе [12] для стали 20MnCr5, аппроксимировали кусочно-линейной функци-

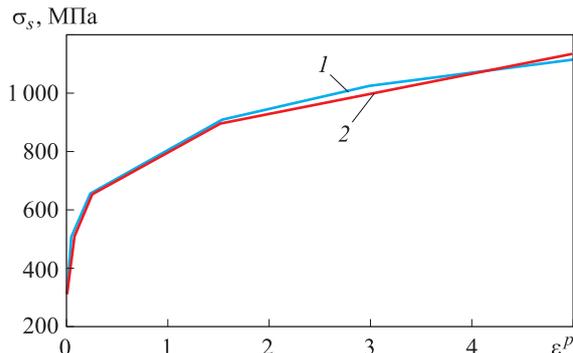


Рис. 1. Кривые упрочнения стали 20MnCr5: 1 — эксперимент; 2 — аппроксимация; σ_s — напряжение течения; ε^P — истинная деформация

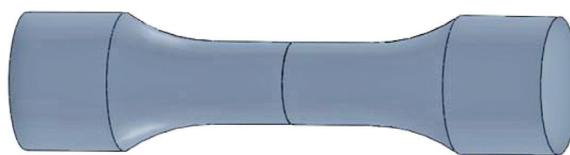


Рис. 2. Образец для моделирования опыта на продольное растяжение

ей и задавали в качестве исходных данных для моделирования (рис. 1).

В работе [12] для опытов на продольное растяжение использовали цилиндрические образцы с рабочей частью диаметром 6 мм и длиной (базой экстензометра) 10 мм (рис. 2). При моделировании напряженно-деформированное состояние принимали осесимметричным. Ввиду очевидной симметрии задачи ограничились моделированием только левой части сечения образца. Сравнение результатов проводили

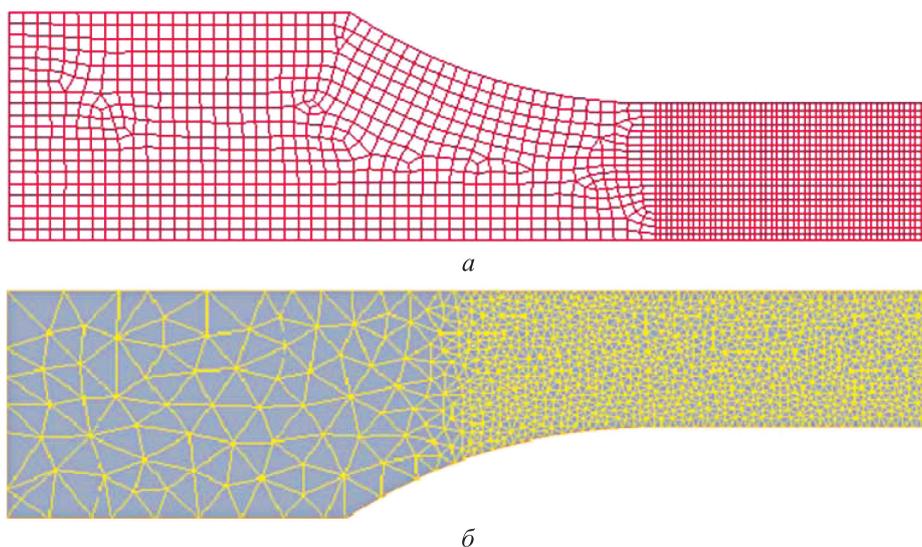


Рис. 3. Сетки конечных элементов при моделировании опыта на растяжение в программах LS-DYNA (а) и QForm (б)

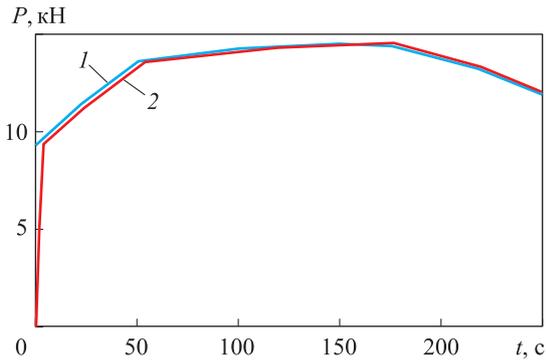


Рис. 4. Зависимость силы деформирования P от времени t при моделировании опыта на растяжение в программах QForm (1) и LS-DYNA (2)

в момент времени, соответствующий разрушению образца в натурных испытаниях. Скорость деформирования образца соответствовала условиям эксперимента (0,01 мм/с) и была одинакова для обеих программ.

В программах QForm и LS-DYNA использован различный тип конечных элементов для 2D-задач: соответственно линейные треугольные элементы с дополнительным центральным узлом для повышения точности аппроксимации поля скоростей и четырехугольные элементы ELEMENT-SHELL первого порядка. При расчете в LS-DYNA сетка конечных элементов в процессе вычислений не перестраивалась, в QForm ее перестроение происходит автоматически. Сетки конечных элементов при моделировании опыта на растяжение приведены на рис. 3.

Размер стороны сетки в очаге ПД принят одинаковым и равным 0,15 мм. Дальнейшее уменьшение размера сетки не приводило к существенному изменению результатов расчета.

Результаты моделирования в двух комплексах сравнивали по графикам силы деформирования и прогнозируемой объемной пористости в момент, соответствующий разрушению в экспериментальных исследованиях*. Как видно из рис. 4, график силы деформирования в программе QForm сдвинут влево вдоль оси абсцисс по отношению к результатам LS-DYNA на значение упругой деформации. Значения ординат характерных точек графиков различаются не

* При расчете использовался процессор Intel® Core(M) i7-4700HQ с тактовой частотой 2,4 ГГц, имеющий 4 ядра и 8 логических процессоров. Общий объем оперативной памяти 8 Гбайт, HDD 2 Тбайт. Настройки параллельного вычисления в обеих программах применялись по умолчанию.

более чем на 3 %. Максимальная пористость (рис. 5) имеет место на оси образца, что соответствует экспериментально наблюдаемому характеру зарождения трещин при одноосном растяжении. Отклонение прогнозируемой в QForm максимальной пористости (0,009522) от результатов расчета в LS-DYNA (0,009718) составляет 2 %.

Для верификации при 3D-моделировании использовали опыты на осадку цилиндрических образцов диаметром 18 мм, высотой 27 мм с продольной проточкой радиусом 1,25 мм (рис. 6). Ввиду очевидной симметрии моделировали половину сечения верхней части образца.

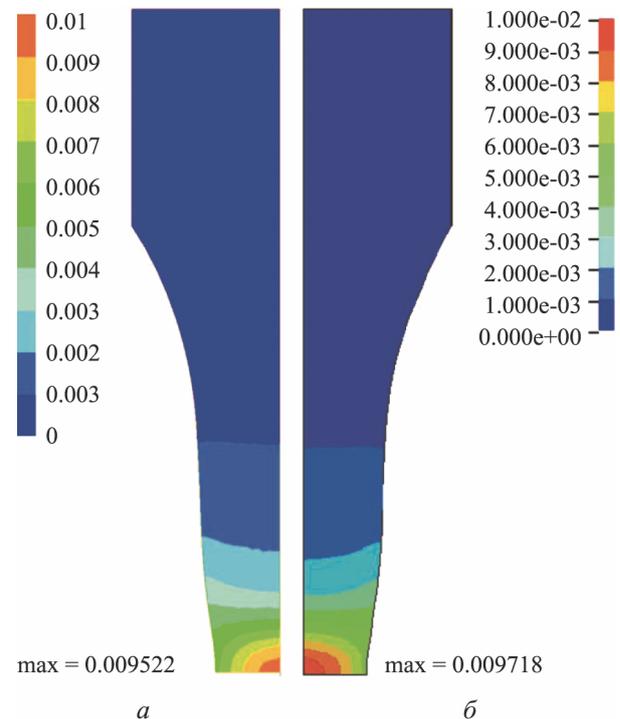


Рис. 5. Поля распределения относительной пористости образца при моделировании опыта на растяжение в программах QForm (а) и LS-DYNA (б)



Рис. 6. Образцы для моделирования опыта на осадку

Отличительная особенность образцов такого типа — образование трещин в заранее известном месте внешней поверхности, что упрощает наблюдение и фиксацию момента разрушения по сравнению со стандартными испытаниями на осадку [12] (рис. 7).

При моделировании скорость перемещения осадочной плиты составляла 1 мм/с, а коэффициент трения по Кулону на контактной поверхности материала с осадочными плитами — 0,1. Поскольку появление трещин локализовано на внутренней части радиусной проточки, в этой области выполнено сгущение сетки конечных элементов. При моделировании 3D-задач в программе LS-DYNA применяли линейные гексагональные элементы ELEMENT-SOLID. Начальный размер элементов на радиусной проточке составлял 0,1 мм по окружности и 0,5 мм по высоте. Перестроение сетки отсутствовало. К моменту образования трещины форма элементов в месте наибольшей пористости приближалась к кубической со стороной 0,25 мм. Для аппроксимации поля скоростей в программе QForm безальтернативно используются линейные тетраэдральные элементы с дополнительным узлом в центре элемента. Перестроение сетки конечных элементов осуществляется автоматически. Размер ребра элемента на радиусной части проточки поддерживался за

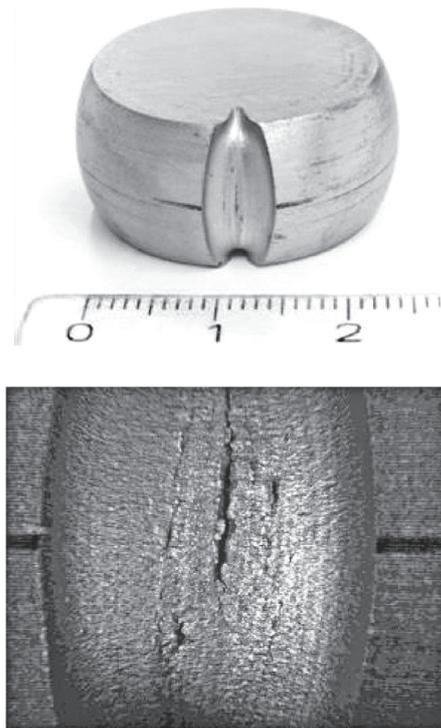


Рис. 7. Разрушение образца в опытах на осадку [12]

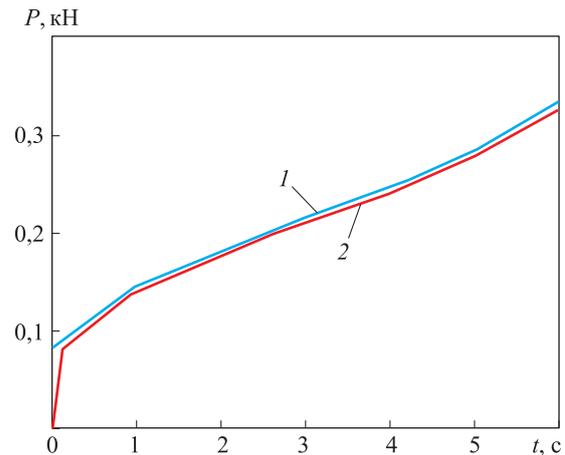


Рис. 8. Зависимость силы деформирования P от времени t при моделировании опыта на осадку в программах QForm (1) и LS-DYNA (2)

счет перестроения приблизительно постоянным и равным 0,1 мм.

Сравнение графиков силы деформирования (рис. 8) во время осадки при моделировании в двух программах показало результаты, аналогичные моделированию растяжения — сдвиг графика QForm на значение упругой деформации образца и совпадение характерных точек с точностью до 3 %.

Максимальное значение пористости в момент времени, соответствующий образованию трещин в реальном опыте, составило 0,00297742 для LS-DYNA и 0,003135 для QForm (рис. 9).

Отклонение максимальной пористости, вычисленной в программе QForm, от результатов расчета в программе LS-DYNA не превышает 5 %. Место возникновения трещин одинаково прогнозируется в центре радиусной проточки.

При сравнении полей распределения относительной пористости вблизи максимальной точки (см. рис. 9) наблюдается различие форм областей высоких значений пористости. Это объясняется тем, что программа LS-DYNA базируется на упругопластической модели материала и непосредственно учитывает изменение объема в процессе моделирования. В предложенной же реализации модель GTN, основанная на несжимаемой жесткопластической модели материала, является приближенной. Кроме того, отличие формы областей также может быть следствием разного типа конечных элементов, используемых в программах LS-DYNA и QForm.

Для прогнозирования разрушения важно знать максимальное значение относительной пористости, которое определяет опасную точку. Ошибку, равную 5 %, при определении макси-

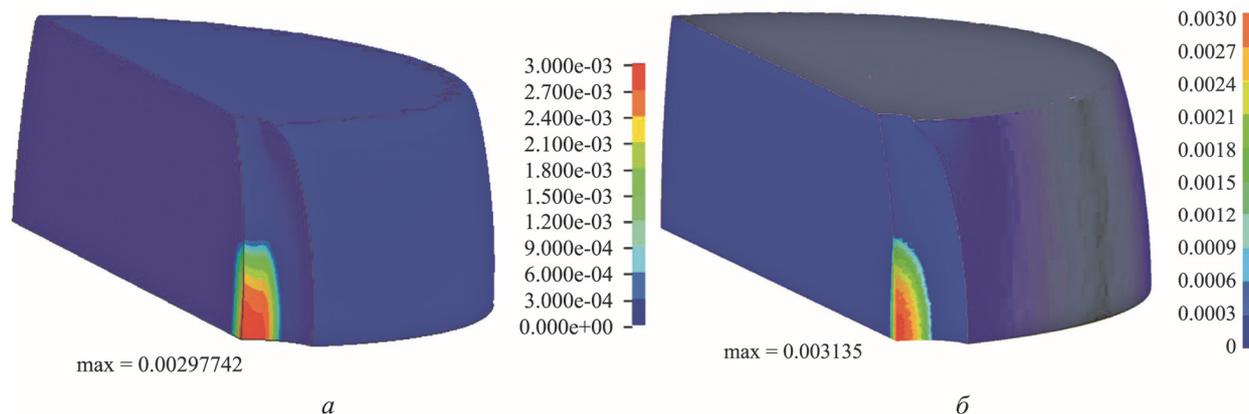


Рис. 9. Поля распределения относительной пористости образца при моделировании опыта на осадку в программах LS-DYNA (а) и QForm (б)

Характеристики требуемых вычислительных ресурсов и производительности расчета в программах LS-DYNA и QForm при моделировании

Характеристика	Опыт на растяжение (2D-задача)		Опыт на сжатие (3D-задача)	
	LS-DYNA	QForm	LS-DYNA	QForm
Шаг расчета*, с	10 ⁻⁴	0,5	10 ⁻⁴	0,1
Время расчета, мин	31	17	132	39
Средний размер элемента, мм	0,15	0,15	0,25	0,25
Число степеней свободы**	3 834	7 300	58 512	360 000
Пиковый запрос оперативной памяти, ГБ	3,9	4,1	3,9	4,7

Примечания.

* В LS-DYNA шаг расчета по умолчанию назначается исходя из времени пробега упругой волны в наименьшем конечном элементе. Для рассмотренных задач он составлял около 10⁻⁸ с, что приводило к колоссальному прогнозируемому времени расчета. Для уменьшения последнего шаг был принят постоянным и равным 10⁻⁴ с. В программе QForm ограничивается лишь максимальный шаг, а текущий шаг изменяется автоматически в соответствии с принятыми внутренними критериями, поэтому здесь указан максимальный шаг.

** Количество степеней свободы в LS-DYNA постоянное, поскольку сетка конечных элементов не изменяется. В QForm происходит адаптация сетки к текущим геометрическим размерам, таким образом, количество степеней свободы переменное, поэтому приведено их среднее значение. В QForm используется дополнительный узел в центре элемента, и в каждом угловом узле, кроме узловых скоростей, — дополнительное неизвестное среднее напряжение.

мальной относительной пористости можно считать удовлетворительным результатом.

Выводы

1. Предложена методика, позволяющая определить коэффициент коррекции значения сопротивления деформированию металла согласно модели GTN по результатам конечно-элементного моделирования жесткопластического несжимаемого материала.

2. Сравнение результатов расчета по предложенной методике с данными моделирования в широко применяемой на практике программе LS-DYNA со стандартной моделью материала

MAT_GURSON показало хорошую качественную и количественную сходимость.

3. Модель с достаточной для практики точностью работает при относительной пористости, не превышающей 1,5 %, вследствие чего пригодна для прогнозирования разрушения металлов и сплавов в процессах холодной объемной штамповки из заготовок, полученных прокаткой.

4. Созданная в виде функции Lua подпрограмма, реализующая модель GTN для программного комплекса QForm, позволяет анализировать процесс накопления поврежденности в процессах холодной объемной штамповки и прогнозировать наиболее вероятное место разрушения заготовок.

Литература

- [1] Калпин Ю.Г., Перфилов В.И., Петров П.А., Рябов В.А., Филиппов Ю.К. *Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 2011. 244 с.
- [2] Стебунов С.А. 25 лет программе моделирования процессов обработки металлов давлением QForm. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2016, № 11, с. 3–5.
- [3] Gurson A.L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I. Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1977, vol. 99, is. 1, pp. 2–15.
- [4] Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions. *International Journal of Fracture*, 1981, vol. 17, pp. 389–407.
- [5] Leblond J.B., Perrin G., Devaux J. An improved Gurson-type model for hardenable ductile metals. *European journal of mechanics and solids*, 1995, vol. 14, is. 4, pp. 499–527.
- [6] Tvergaard V., Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*, 1984, vol. 32, is. 1, pp. 157–169.
- [7] Trong Son Cao. *Modeling ductile damage for complex loading paths*. PhD thesis. Paris, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013.
- [8] Huang C.-C., Cheng J.-H. Forging simulation of sintered powder compacts under various frictional conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, vol. 44, pp. 489–507.
- [9] Aravas N. On the numerical integration of a class of pressure-dependent plasticity models. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1987, vol. 24, pp. 1395–1416.
- [10] Vadillo G., Fernández-Sáez J. An analysis of Gurson model with parameters dependent on triaxiality based on unitary cells. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2009, vol. 28, pp. 417–427.
- [11] Zapara M., Augenstein E., Helm D. A mechanism-based model for prediction of damage and failure in cold forging processes. *Proceedings of the 49th Plenary Meeting of the International Cold Forging Group*, Stuttgart, Germany, 4–7 September 2016, pp. 99–102.
- [12] Zapara M., Augenstein E., Helm D. Prediction of damage in cold bulk forming processes. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, vol. 14, is. 1, pp. 1037–1040.
- [13] Wallner S., Hatzenbichler T., Buchmayr B. Implementieren von Fließbedingungen in DEFORM 3D™ zur FEM-Simulation der Verdichtung von PM-Werkstoffen. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 2008, vol. 153, is. 11, pp. 435–438.
- [14] Neukamm F., Feucht M., Haufe A., Roll K. On closing the constitutive gap between forming and crash simulation. In *10th International LS-DYNA Users Conference*, 2008, Dearborn, Michigan, USA, pp. 12-21–12-32. URL: <http://www.dynalook.com/international-conf-2008/MetalForming3-3.pdf> (дата обращения 15 марта 2017).
- [15] Schmeing F., Feucht M., Haufe A. Forming and Crash Induced Damage Evolution and Failure Prediction Part 1: Extension of the Gurson Model to forming Simulations, *LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal*, 2007, pp. H-I-1–H-I-10. URL: <http://www.dynamore.it/en/downloads/papers/07-forum/forming-to-crash/forming-and-crash-induced-damage-evolution-and> (дата обращения 15 марта 2017).

References

- [1] Kalpin Yu.G., Perfilov V.I., Petrov P.A., Riabov V.A., Filippov Yu.K. *Soprotivlenie deformatsii i plastichnost' pri obrabotke metallov davleniem* [Deformation resistance and plasticity in the processing of metals by pressure]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2011. 244 p.
- [2] Stebunov S.A. 25 let programme modelirovaniia protsessov obrabotki metallov davleniem QForm [25 years of the program for simulation of forming processes QForm]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure]. 2016, no. 11, pp. 3–5.
- [3] Gurson A.L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I. Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1977, vol. 99, is. 1, pp. 2–15.

- [4] Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions. *International Journal of Fracture*, 1981, vol. 17, pp. 389–407.
- [5] Leblond J.B., Perrin G., Devaux J. An improved Gurson-type model for hardenable ductile metals. *European journal of mechanics and solids*, 1995, vol. 14, is. 4, pp. 499–527.
- [6] Tvergaard V., Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*, 1984, vol. 32, is. 1, pp. 157–169.
- [7] Trong Son Cao. *Modeling ductile damage for complex loading paths*. PhD thesis. Paris, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013.
- [8] Huang C.-C., Cheng J.-H. Forging simulation of sintered powder compacts under various frictional conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, vol. 44, pp. 489–507.
- [9] Aravas N. On the numerical integration of a class of pressure-dependent plasticity models. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1987, vol. 24, pp. 1395–1416.
- [10] Vadillo G., Fernández-Sáez J. An analysis of Gurson model with parameters dependent on triaxiality based on unitary cells. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2009, vol. 28, pp. 417–427.
- [11] Zapara M., Augenstein E., Helm D. A mechanism-based model for prediction of damage and failure in cold forging processes. *Proceedings of the 49th Plenary Meeting of the International Cold Forging Group*, Stuttgart, Germany, 4–7 September 2016, pp. 99–102.
- [12] Zapara M., Augenstein E., Helm D. Prediction of damage in cold bulk forming processes. *A proceeding in Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, vol. 14, is. 1, pp. 1037–1040.
- [13] Wallner S., Hatzenbichler T., Buchmayr B. The conditions for the exercise of the warp fluctuations in 3D[™] FEM for modeling the compaction of PM materials. *BHM mining and metallurgical mannish month folders*, 2008, vol. 153, is. 11, pp. 435–438.
- [14] Neukamm F., Feucht M., Haufe A., Roll K. On closing the constitutive gap between forming and crash simulation. In *10th International LS-DYNA Users Conference*, 2008, Dearborn, Michigan, USA, pp. 12-21–12-32. Available at: <http://www.dynalook.com/international-conf-2008/MetalForming3-3.pdf> (accessed 15 March 2017).
- [15] Schmeing F., Feucht M., Haufe A. Forming and Crash Induced Damage Evolution and Failure Prediction Part 1: Extension of the Gurson Model to forming Simulations. *LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal*, 2007, pp. H-I-1–H-I-10. Available at: <http://www.dynamore.it/en/downloads/papers/07-forum/forming-to-crash/forming-and-crash-induced-damage-evolution-and> (accessed 15 March 2017).

Статья поступила в редакцию 17.04.2017

Информация об авторах

ВЛАСОВ Андрей Викторович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки давлением». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: anvvlasov@mail.ru).

ГЕРАСИМОВ Дмитрий Александрович (Москва) — инженер ООО «КванторФорм» (115088, Москва, Российская Федерация, а/я 74, e-mail: gerasimov@qform3d.com).

Information about the authors

VLASOV Andrey Victorovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Metal Forming Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: anvvlasov@mail.ru).

GERASIMOV Dmitriy Aleksandrovich (Moscow) — Engineer, ООО QuantorForm (115088, Moscow, Russian Federation, P. O. Box 74, e-mail: gerasimov@qform3d.com).