

Технология и технологические машины

УДК 621.735:519.673

Прогнозирование механических свойств изделия после холодной радиальной ковки по результатам конечно-элементного моделирования

А.Я. Дмитриева

Объектом исследования является технологический процесс упрочнения радиальной ковкой спеченного материала. В работе создана модель процесса радиальной ковки для программного комплекса DEFORM3D. Разработана подпрограмма прогнозирования поврежденности материала в процессе радиальной ковки и предложена методика прогнозирования механических свойств (прочность и пластичность). Проведено сравнение результатов прогнозирования с натурным экспериментом.

Ключевые слова: радиальная ковка, моделирование, метод конечных элементов, ресурс пластичности, прогнозирование, предел прочности, относительное удлинение.

The object of research is the technological process of the hardening of sintered material by the radial forging. The model of radial forging was made for the software system DEFORM3D. A routine prediction of damage of the material in the process of radial forging and the technique of predicting the mechanical properties (ultimate strength and extension strain) were developed in this work. A comparison between predicted results and natural experiments was made.

Keywords: methodology of definition product's mechanical properties after cold radial forging in the software system deform3d.



ДМИТРИЕВА
Анастасия Яковлевна
аспирант кафедры
«Технология обработки
давлением»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Постановка задачи

Одной из нерешенных на современном этапе развития теории и технологии обработки давлением задач является прогнозирование свойств материала после его пластической деформации. Современные методы расчета [1], основанные на конечно-элементном моделировании, позволяют определить напряженно-деформированное состояние изделия в произвольный момент технологического процесса в любой материальной точке, но не дают ответа на вопрос, какова будет прочность и пластичность материала после его обработки давлением. Решение этой задачи особенно актуально для технологических процессов, специально предназначенных для улучшения механических свойств исходного материала.

В предлагаемой работе рассматривается технологический процесс упрочнения сплава, полученного жидкофазным спеканием из смеси порошков. Упрочнение производится радиальной ковкой материала в холодном состоянии, поскольку данный процесс (за счет сложного пути нагружения в сочетании с наиболее благоприятной схемой напряженного состояния) позволяет накопить большие пластические деформации без разрушения материала.

Механические свойства материала после радиальнойковки зависят от технологических режимов (продольная подача, степень деформации, угол поворота между ударами бойков) и параметров инструмента (геометрические размеры бойков и их форма). Чтобы оценить эффективность различных вариантов, не прибегая к натурному эксперименту, при котором оценить параметры бойков практически невозможно, необходимо уметь прогнозировать механические свойства полученного изделия. Для этого была разработана математическая модель процесса в программном комплексе DEFORM3D, создана подпрограмма, позволяющая прогнозировать степень использования ресурса пластичности и разработана методика прогнозирования прочностных (предел прочности) и пластических (относительное удлинение) свойств материала после радиальной

ковки. Точность расчетов, выполненных по разработанной методике, проверена натурным экспериментом.

Математическая модель

Радиальная ковка осуществляется на радиально-ковочных (обжимных) машинах. Деформация заготовки производится за счет одновременного действия четырех бойков в радиальном направлении (рис.1). В процессе радиальнойковки исходная заготовка уменьшается в поперечном сечении и увеличивается в длине [2].

Заготовка в процессе деформирования за счет механизма зажимной головки осуществляет продольное перемещение и непрерывный поворот вокруг своей оси. В процессе деформации помимо радиальных сил также возникают продольные силы, которые упруго деформируют механизм продольного перемещения, имеющий значительную податливость. Механизм поворота спроектирован таким образом, что в процессе силового воздействия бойков на заготовку происходит его проскальзывание. Таким образом, непосредственно в процессе деформации заготовки не вращается.

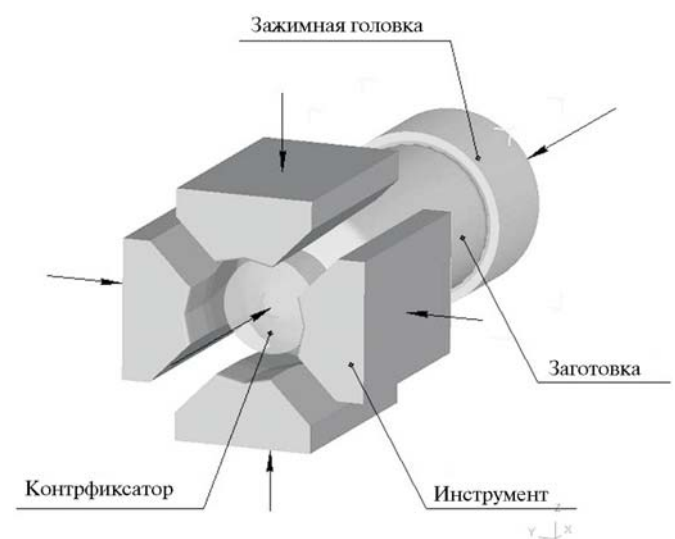


Рис. 1. Схема действия сил при радиальной ковке

Механизм контрфиксатора создает силу, противодействующую продольной подаче заготовки. За счет этого осуществляется продольное зажатие заготовки и создаются дополнительные сжимающие напряжения в очаге пластической деформации.

Математическая модель процесса радиальнойковки создана в программном комплексе DEFORM3D [3], предназначенном для конечно-элементного моделирования больших пластических деформаций. Исходными данными для осуществления моделирования процесса радиальнойковки являются: геометрия заготовки и используемых в процессековки инструментов, реологическая модель материала заготовки, величины продольной и угловой подачи заготовки, сила контрфиксатора и продольная податливость механизма зажимной головки. Для создания модели были приняты следующие допущения:

поскольку заготовка получена жидкофазным спеканием и ее остаточная пористость не превышает 1%, материал считаем сплошным;

упругими деформациями материала в процессековки пренебрегаем, принимая жестко-пластическую модель материала с нелинейным деформационным упрочнением;

процессами деформационного разогрева и теплообмена с окружающей средой пренебрегаем;

принимаем трение между материалом и заготовкой по модели Прандтля — Зибеля с фактором трения, равным 0,25;

бойки во время рабочего хода движутся навстречу друг другу с постоянной скоростью. Процессами, происходящими за время хода приближения, пренебрегаем;

влияние контрфиксатора учитываем действием постоянной силы поджатия, приложенной к абсолютно жесткому элементу, находящемуся в постоянном контакте с заготовкой;

зажимная головка представлена в виде подпружиненного абсолютно-жесткого элемента, находящегося в постоянном контакте с заготовкой. Жесткость упругой связи рассчитана как жесткость привода зажимной головки;

возможностью проскальзывания заготовки как жесткого целого в окружном направлении во время деформации пренебрегаем;

между двумя ударами заготовка подается дискретно на величину продольной и угловой подачи;

продольная подача моделируется методом обращенного движения за счет синхронного продольного перемещения бойков между ударами на величину хода подачи в сторону, противоположную направлению подачи;

угловая подача моделируется поворотом заготовки как жесткого целого на угол поворота зажимной головки за один ход бойка.

Математическая модель в программном комплексе DEFORM3D основана на физических уравнениях связи напряженного и деформированного состояний Сен-Венана — Леви — Мизеса

$$\sigma'_{nj} = \frac{3}{2} \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij}.$$

Здесь σ'_{nj} — компоненты девиатора напряжений; $\bar{\sigma}$ — интенсивность напряжений, в соответствии с условием пластичности Мизеса

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{3}{2} \sigma'_{nj} \sigma'_{nj} = Y^2,$$

где Y — напряжение текучести материала при одноосном растяжении; $\dot{\epsilon}$ — интенсивность скоростей деформаций; $\dot{\epsilon}_{ij}$ — компоненты тензора скоростей деформаций.

Вместе с дифференциальными уравнениями равновесия $\sigma_{ij,i} = 0$ и континуальными соотношениями $\dot{\epsilon}_{ij} = 0,5(v_{i,j} + v_{j,i})$, связывающими поле скоростей v с полем скоростей деформаций, физические уравнения составляют замкнутую систему, решаемую методом конечных элементов. Дискретизация объема основывается на известном вариационном соотношении [1], в котором последний интеграл является штрафной функцией, учитывающей закон постоянства объема при пластической деформации:

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV - \int_S p \delta v dS + \int_V A \dot{\epsilon}_V \delta \dot{\epsilon}_V dV = 0.$$

Здесь p — удельные внешние силы; v — скорости в проекции на направления внешних сил; $\dot{\epsilon}_V$ — скорость объемной деформации, $\dot{\epsilon}_V = \dot{\epsilon}_{ii}$; A — большая константа. Для дискретизации объема используются конечные элементы первого порядка.

Разработанная математическая модель позволила определить напряженно-деформированное состояние заготовки в произвольный момент времени процессаковки для любой материальной точки [4]. С помощью постпроцессора комплекса DEFORM3D можно определить накопленные пластические деформации, и, следовательно, прогнозировать прочностные свойства полученного изделия. В то же время для прогнозирования пластических свойств материала необходимо знать накопленную поврежденность материала (степень использования ресурса пластичности), которую нельзя определить непосредственно в постпроцессоре. Эту величину (накопленную поврежденность или степень использования ресурса пластичности) можно получить, обработав данные конечно-элементного моделирования.

В настоящее время не существует общепризнанной методики прогнозирования разрушения металлов при больших пластических деформациях. Большинство критериев, которые предлагаются различными исследователями, носят феноменологический характер. Работы отечественных ученых (Г.А. Смирнов-Аляев, В.Л. Колмогоров, В.А. Огородников, Г.Д. Дель, А.А. Богатов и другие [5—7]) показали, что накопленная деформация в момент разрушения при монотонном деформировании в максимальной степени зависит от отношения среднего напряжения к интенсивности напряжений. Графически такая зависимость отображается диаграммой пластичности, которая является характеристикой материала и для большинства материалов нелинейна.

В диаграмме пластичности по оси абсцисс откладывают коэффициент жесткости напряженного состояния $\eta = \frac{3\sigma_m}{\bar{\sigma}}$ ($\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$ — среднее напряжение), а по оси ординат — накопленную пластическую деформацию в момент разрушения $\bar{\epsilon}_0$ (предельную деформацию), определяемую по результатам опытов при постоянном η . Диаграммы пластичности различных материалов показывают, что с уменьшением жесткости напряженного состояния, пластичность материала, оцениваемая предельной деформацией до разрушения, возрастает.

В настоящей работе используется тензорный деформационный критерий Деля [6]. В этом критерии предполагается, что накопление повреждений анизотропно и зависит от кривизны траектории деформаций в пространстве деформаций. Степень поврежденности в пространственных направлениях определяется тензором повреждений ψ_{ij} , компоненты которого определяют по формуле:

$$\psi_{ij} = \int_0^{\bar{\epsilon}_t} F(\bar{\epsilon}_t, \eta) \beta_{ij} d\bar{\epsilon}, \quad (1)$$

где $\bar{\epsilon}_t$ — накопленная деформация к моменту времени t ; β_{ij} — компоненты направляющего тензора скоростей деформаций (постоянны при простом нагружении), $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\dot{\epsilon}_{ij}}{\dot{\bar{\epsilon}}}$.

Функция $F(\bar{\epsilon}_t, \eta)$ согласно [6] имеет вид:

$$F(\bar{\epsilon}_t, \eta) = \frac{1-\alpha}{\bar{\epsilon}_0(\eta)} + \frac{2\alpha\bar{\epsilon}_t}{\bar{\epsilon}_0^2(\eta)}, \quad (2)$$

где α — коэффициент, отражающий нелинейность накопления повреждений. Значение $\alpha = 0$ соответствует гипотезе линейного накопления повреждений. Г.Д. Дель на основании проведенных им опытов рекомендует $\alpha = 0.5$.

Условием появления макротрещины (условие разрушения) является равенство единице модуля тензора повреждений:

$$\Psi = \sqrt{\psi_{ij}\psi_{ij}} = 1. \quad (3)$$

Вычисление поврежденности по приведенным выше критериям требует знания напряженно-деформированного состояния в произвольный момент времени деформирования. Программный комплекс DEFORM позволяет создать подпрограммы пользователя, с помощью которых обрабатывают результаты моделирования. Для этого необходимо написать подпрограммы на языке FORTRAN с использованием среды разработки AbsoftFortran9.0.

Исходными данными для работы подпрограммы [8] является база данных результатов расчета и файл исходных данных.

Файл исходных данных текстовый, доступен для редактирования пользователем и содержит следующую информацию:

коэффициенты аппроксимации диаграммы пластичности экспоненциальной функцией;

коэффициент, отражающий нелинейность накопления поврежденности α ;

сведения о повороте заготовки как жесткого целого между операциями.

Разработанная подпрограмма рассчитывает степень поврежденности по используемому критерию разрушения, а также показатель жесткости напряженного состояния η и параметр напряженного состояния Лоде-Надаи μ_σ . При вычислении степени поврежденности по используемому критерию разрушения интегрирование осуществляли методом трапеций.

Отличительной особенностьюковки на радиально-ковочной машине является поворот заготовки как жесткого целого между циклами обжатия. Для адекватного анализа поврежденности при таком повороте по критерию Деля необходимо преобразовать тензор поврежденности по известной зависимости

$$Y_{i'j'} = n_{i'j} n_{j'i} Y_{ij}.$$

Здесь $Y_{i'j'}$, Y_{ij} — компоненты тензора поврежденности соответственно в новой и старой системе координат, $n_{i'j}$ — направляющие косинусы новой системы координат относительно старой, $i, j = x, y, z$.

Тестирование подпрограммы проводилось для операции протяжки бруска с квадрата на

квадрат на плоских бойках с кантовкой заготовки на 90° вокруг оси X после каждого обжатия. Такая операция, в отличие от радиальнойковки, допускает аналитическое решение, что позволяет провести верификацию предлагаемой методики. Аналитический расчет данной операции в среде MathCAD приведен в учебном пособии [9]. Для проверки адекватности выполнения разработанной подпрограммы операция протяжки была промоделирована методом конечных элементов и обработана разработанной подпрограммой для расчета поврежденности. Полученные в результате моделирования результаты совпадают с аналитическими расчетами с ошибкой до 2%.

Методика прогнозирования механических свойств материала по результатам конечно-элементного моделирования процесса радиальнойковки

Методика предназначена для прогнозирования предела прочности (временного сопротивления) материала σ_b и относительного удлинения при разрыве δ и состоит из нескольких этапов:

- 1) предварительный эксперимент по определению исходных свойств заготовки и построения реологической модели;
- 2) виртуальный эксперимент процесса радиальнойковки для определения накопленной пластической деформации и остаточного ресурса пластичности (остаточный ресурс пластичности определяется вычитанием из единицы степени поврежденности);
- 3) виртуальный эксперимент на растяжение для определения предела прочности и относительного удлинения при растяжении деформированного материала.

Если необходимые для расчета кривая упрочнения и диаграмма пластичности известны из технической литературы, предварительный эксперимент можно не проводить. Для сплава, использованного в дальнейшем натурном эксперименте, таких данных обнаружить не удалось, поэтому кривая упрочнения и диа-

грамма пластичности были построены на основании опытов на растяжение и сжатие с последующей аппроксимацией экспоненциальной зависимостью.

Второй этап выполняли с использованием математической модели, описанной выше, обрабатывая данные в приведенной ниже последовательности:

- 1) моделирование процессаковки до достижения установившейся стадии;
- 2) постпроцессорная обработка результатов моделирования с помощью разработанной подпрограммы анализа поврежденности;
- 3) построение распределения накопленных деформаций и поврежденности в продольном сечении детали и определение момента начала установившейся стадииковки на продольной оси;
- 4) построение распределения накопленных деформаций и поврежденности в поперечном сечении на установившейся стадии и определение поврежденности и накопленных деформаций на половине радиуса готовой детали с усреднением результатов в точках на одном диаметре.

Верификация методики производилась на процессе радиальнойковки. Для этого был смоделирован процесс и проведен натурный эксперимент со следующими исходными данными: первоначальный диаметр заготовки 43 мм, конечный диаметр прокованной заготовки

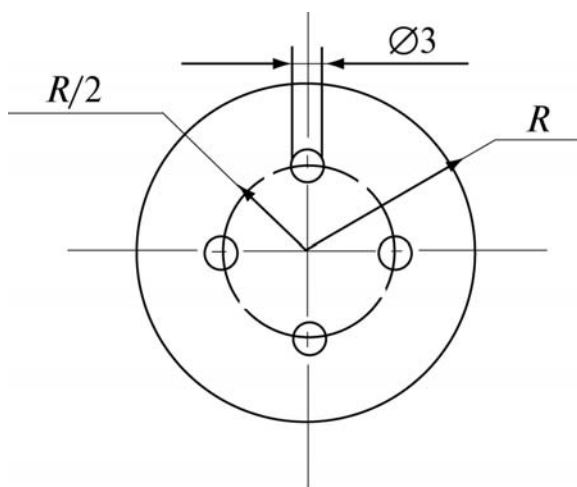


Рис. 2. Схема вырезки образцов из поперечного сечения

товки 34 мм, использовались бойки, имеющие ромбическую форму с углом раствора 155° , продольная подача заготовки 200 мм/мин, угловая подача — 13 град/ход. Из прокованной заготовки для контроля механических свойств (прочности и пластичности) вырезали разрывные образцы и проводили опыт на растяжение.

По результатам моделирования определили прогнозируемое значение накопленной деформации $\tilde{\epsilon}_k = 0,522$ и прогнозируемое значение поврежденности $\tilde{\psi}_k = 0,171$. Тогда остаточный ресурс пластичности материала:

$$\tilde{\psi}_p = 1 - \tilde{\psi}_k = 1 - 0,171 = 0,829.$$

На последнем этапе реализации методики выполняется виртуальный эксперимент на растяжение образцов фиктивно вырезанных из готовой детали (образцы вырезаются из середины радиуса конечной детали, рис. 2). Образец имеет форму и размеры, идентичные используемым в натурном опыте на растяжение. По результатам моделирования процесса одноосного растяжения предварительно прокованного материала определяется момент когда поврежденность в опасном сечении достигает величины остаточного ресурса пластичности (в нашем случае $\tilde{\psi}_p = 0,829$). Относительное удлинение в этот момент времени будет представлять собой прогнозируемую величину относительного удлинения в момент разрыва. Для исследуемого технологического процесса эта величина составила $\tilde{\delta} = 15,9\%$.

Предварительно предел прочности рассчитывают по формуле

$$\tilde{\sigma}_b = \frac{P_{\max}}{F_0} = 1477 \text{ МПа},$$

где P_{\max} — максимальная сила, возникающая при виртуальном опыте $P_{\max} = 10,44 \text{ кН}$; F_0 — начальная площадь поперечного сечения образца, $F_0 = 0,25\pi d_0^2 = 7,0686 \text{ мм}^2$.

Прогнозируемые свойства сравнивали с результатами натурного эксперимента на растяжение, выполненного для определения свойств

материала, полученных послековки при тех же технологических режимах, форме и размерах инструмента, что и рассмотренное выше моделирование:

Номер образца.....	1	2	3	4
σ_b , МПа.....	1350	1350	1350	1350
δ , %.....	14,2	12	9,6	15

Отклонение прогнозируемых величин от результатов натурального эксперимента, составляет:

по пределу прочности +9,6%;

по относительному удлинению +6...32%.

Большой разброс отклонений по прогнозу относительного удлинения может быть объяснен неточностью позиционирования вырезанных для опытов образцов относительно центра конечной детали, поскольку расчеты показывают существенную неравномерность распределения свойств материала в поперечном сечении готовой детали. Это предположение подтверждается существенным разбросом относительных удлинений, полученных в опыте на растяжение в натурном эксперименте. Если отбросить выпадающие значения, то ошибка прогнозирования относительного удлинения не превышает 10%.

Вывод

Разработанная методика, базирующаяся на конечно-элементном моделировании технологического процесса с последующей обработкой результатов для определения ресурса пластич-

ности (поврежденности) по критерию Деля, с достаточной точностью позволяет прогнозировать прочностные и пластические свойства материала после холодной радиальнойковки. Методика может быть использована для прогнозирования свойств изделий при других технологических операциях холодной объемнойковки.

Литература

1. Kobayashi S., Oh S.I., Altan T. Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press, 1989.
2. Ковка на радиально-обжимных машинах / В.А.Тюрин, В.А.Лазоркин, И.А.Поспелов и др. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
3. DEFORM™ 3D Version 6.1 User's Manual.
4. Власов А.В., Дмитриева А.Я. Определение оптимальных параметров технологического процесса радиальнойковки // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2009. № 9. URL. <http://tecnomag.edu.ru/doc/132181.html>.
5. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета, 2001. 836 с.
6. Дель Г.Д. Пластичность деформированного материала // Физика и техника высоких давлений. 1983. № 11. С. 28—32.
7. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983. 174 с.
8. Власов А.В. Расчет поврежденности металла при холодной радиальнойковки по результатам конечно-элементного моделирования в программе DEFORM3D // Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и обработки давлением: Сб. докладов и материалов IX Конгресса «Кузнец-2009». Рязань, 2009. С. 204—218.
9. Шестаков Н.А. Расчеты процессов обработки металлов давлением. Решение задач энергетическим методом: М.: МГИУ, 2008. 344 с.

Статья поступила 29.04.2011 г.