

УДК 621.777

Анализ различных методов разработки процесса изготовления корпусных деталей комбинированным выдавливанием

А. Ю. Аксёненко^а, Н. В. Коробова, А. М. Дмитриев

ФБГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»,
Россия, 127994, г. Москва, Вадковский пер., д. 3а

E-mail: ^аaksenenkoa@gmail.com

Получено 1 июля 2014 г.

В статье приведен обзор существующих методов расчета технологических параметров операции комбинированного выдавливания, выполнены аналитические расчеты для детали-представителя, а также проведено компьютерное моделирование процесса в программном комплексе DEFORM 3D. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных различными методами, определены основные факторы, оказывающие значительное влияние на достоверность результатов.

Ключевые слова: холодная объемная штамповка, комбинированное выдавливание, компьютерное моделирование

The analysis of various design methods for production of housing parts by combined extrusion

A. Yu. Aksenenko, N. V. Korobova, A. M. Dmitriev

STANKIN Moscow State Technological University, 3a Vadkovsky lane, Moscow, 127994, Russia

Abstract. — The article contains review of various estimation methods of combined extrusion process for the representative part, also analytical calculations and numerical simulation of this process using program DEFORM 3D. The comparative analysis of the results obtained by different methods was made. The assumptions of the main factors having a significant effect on the reliability of the results were formulated.

Keywords: cold volume forging, combined extrusion, numerical simulation

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 967–974 (Russian).

Введение

В автомобиле- и тракторостроении широкое распространение имеют детали типа обгонных муфт, представляющие собой по конструктивному типу сложнопрофильный стакан с наружным полым стержнем. На рисунке 1 изображена трехмерная модель типовой детали — корпуса обгонной муфты.

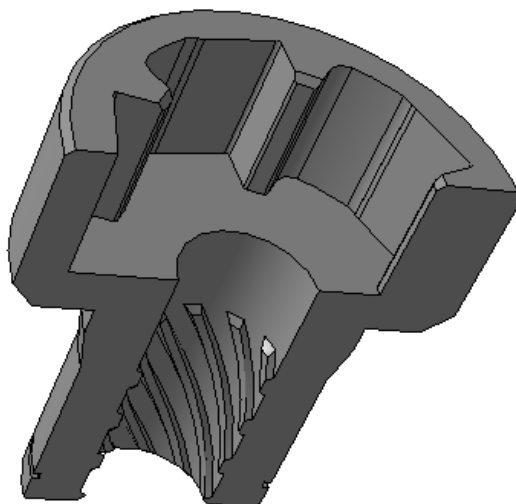


Рис. 1. 3D модель корпуса обгонной муфты (разрез)

На сегодняшний день на предприятиях, выпускающих указанные детали, используется технология, включающая в себя изготовление сложнопрофильного стакана и хвостовика механической обработкой из цилиндрических заготовок с последующей сваркой. Недостатки применяемого способа обуславливают актуальность разработки альтернативной технологии изготовления, которая позволит сократить издержки, увеличить производительность и повысить качество выпускаемой продукции.

В предлагаемой статье рассматривается возможность изготовления данного типа деталей холодной объемной штамповкой, а также рассматриваются методы определения технологических параметров процесса изготовления.

В качестве основной формоизменяющей операции предлагается использовать комбинированное выдавливание. Применение комбинированного выдавливания позволяет снизить упрочнение материала по сравнению с последовательным деформированием посредством прямого и обратного выдавливания.

Не существует обобщенной методики расчета операций комбинированного выдавливания, так как это связано с определенными сложностями. Прежде всего, это невозможность однозначного определения кинематических параметров, учитывающих граничные условия, а также формы, размеры и эволюцию очагов деформаций. Известны отдельные частные случаи комбинированного выдавливания стакана с отростком из сплошной или полый заготовки, см. рисунки 2а и 2б соответственно [Дмитриев, Воронцов, 2005; Оленин, 1972].

Для расчета основных параметров процесса комбинированного выдавливания воспользуемся методами, изложенными в работах [Дмитриев, Воронцов, 2005; Оленин, 1972].

Исходные данные для расчета:

Материал поковки: Сталь 10 ГОСТ 1050-88; исходный диаметр заготовки: $D_0 = 60$ мм; высота заготовки: $H = 26$ мм; приведенный диаметр полости: $D = 45.7$ мм; диаметр стержня:

$d = 34$ мм; толщина дна: $h = 6$ мм; длина калибрующего пояса матрицы: $L_m = 10$ мм; длина калибрующего пояса пуансона: $L_n = 60$ мм; коэффициент трения: $\mu = 0.1$.

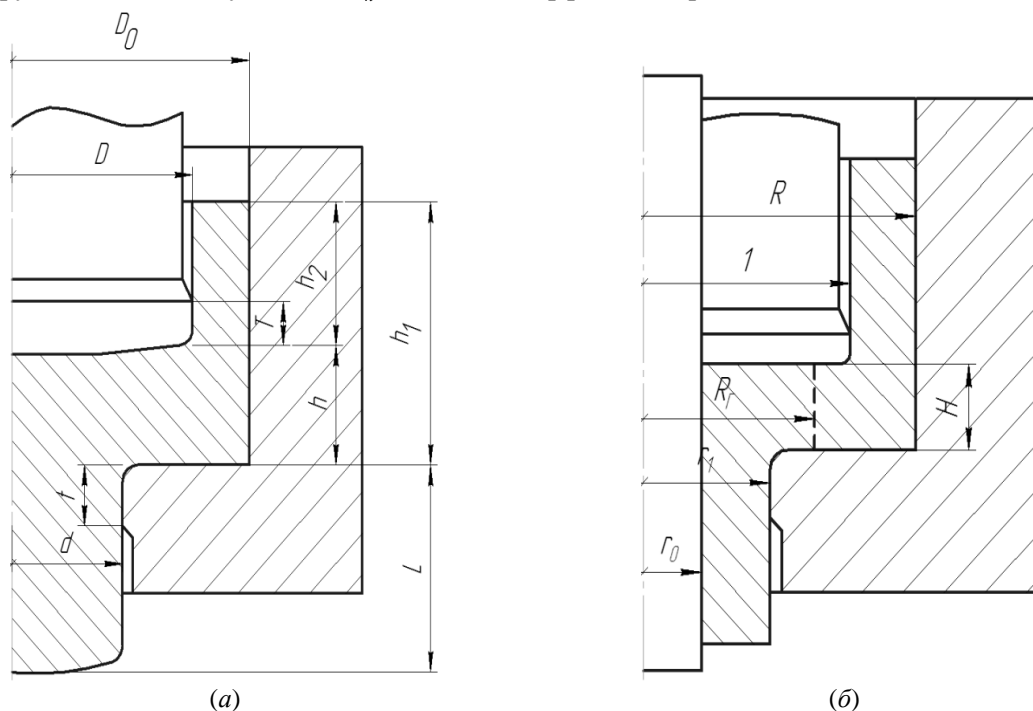


Рис. 2. Схемы комбинированного выдавливания для получения полуфабриката типа стакан с наружным стержнем (а) и стакан с наружным полным стержнем (б)

Большинство теоретических решений сделано для осесимметричных поковок, поэтому при расчетах примем форму внутренней полости стакана — цилиндрической с диаметром $D = 45.7$ мм в нашем случае. Диаметр D получен с учетом равенства площадей поперечного сечения сложной формы и площади эквивалентного сечения $D = \sqrt{\frac{4F_{\text{плоскости}}}{\pi}}$. Площадь поперечного сечения полости сложной формы, а также объем детали и поковки, определим с помощью CAD системы Autodesk Inventor.

Исходная заготовка — цилиндрическая, полученная из прутка. Перед выдавливанием обычно заготовки подвергаются отжигу, очистке, фосфатированию и омыливанию, что способствует снижению трения на рабочих поверхностях [Дмитриев, 1989].

Расчет технологических параметров операции комбинированного выдавливания методом пластического течения [Дмитриев, Воронцов, 2005]

При расчетах все геометрические размеры имеют относительные величины, отнесены к радиусу пуансона, что видно на схеме рисунка 2б. Данное решение справедливо для стадии выдавливания, при которой происходит слияние очагов пластической деформации обратного выдавливания и прямого выдавливания. Значение относительного давления на этапе выдавливания, когда очаги пластической деформации разделены «жесткой зоной», определяют с достаточной для инженерных расчетов точностью по формулам для обратного выдавливания [Дмитриев, Воронцов, 2005]. Очаг пластической деформации цилиндрический, имеет две зоны: обратного выдавливания 1 и прямого выдавливания 2, условно разделенные цилиндриче-

ской поверхностью радиусом R_{Γ} , который может быть определен двумя способами: численным методом или с помощью эмпирической формулы (2). При расчетах принимаем значение радиуса оправки $r_0 = 0$.

Высота очага пластической деформации H_c [Дмитриев, Воронцов, 2005], где происходит слияние двух зон

$$H_c = \sqrt{\frac{(R^2 - 1) \cdot (\mu_0 - \mu_1)}{2 \cdot (1 + 2 \cdot \mu \cdot R)}} = 0.239, \quad H_c \cdot R = 5.459 \text{ мм.} \quad (1)$$

Радиус границы раздела зон прямого и обратного выдавливания R_{Γ} может быть с достаточной точностью определен следующим образом:

$$R_{\Gamma} = \frac{R \cdot r_1 - r_0}{R - 1 + r_1 - r_0} = 0.924. \quad (2)$$

Определяем относительное давление q_1 , действующее на пуансон в зоне 1, обратного выдавливания стенки стакана.

$$q_1 = 1.1 \cdot \left[2 + \ln R + \frac{1 + 2 \cdot \mu \cdot R}{2 \cdot (R^2 - 1)} \cdot H + \frac{(\mu_0 + \mu_1) \cdot [1 - 4 \cdot R_{\Gamma}^2 + R_{\Gamma}^4 \cdot (3 - 4 \cdot \ln R_{\Gamma})]}{4 \cdot (1 - R_{\Gamma}^2)^2 \cdot H} + \frac{\mu \cdot R}{1 + \mu \cdot R} \right]. \quad (3)$$

Вычисляем относительное давление q_2 , действующее в зоне 2, прямого выдавливания стержня

$$q_2 = \frac{1.1}{R_{\Gamma}^2 - r_0^2} \cdot \left\{ 1.5 \cdot (R_{\Gamma}^2 - r_1^2) + \left[\frac{(0.5 + \mu_2' r_0) \cdot (R_{\Gamma}^2 + r_1^2 - 2 \cdot r_0^2)}{r_1^2 - r_0^2} - (\mu_1 - \mu_0) \cdot r_1 \right] \cdot H + \right. \\ \left. + R_{\Gamma}^2 \cdot \ln \frac{R_{\Gamma}}{r_1} + \frac{(\mu_0 + \mu_1) \cdot \left[R_{\Gamma}^4 \cdot \left(\ln \frac{R_{\Gamma}}{r_1} - 0.75 \right) + R_{\Gamma}^2 \cdot r_1^2 - 0.25 \cdot r_1^4 \right] \cdot r_1}{(R_{\Gamma}^2 - r_1^2) \cdot H} \right\}. \quad (4)$$

Результирующая величина общего относительного давления на пуансон будет равна:

$$q = \frac{q_1(1 - R_{\Gamma}^2) + q_2(R_{\Gamma}^2 - r_0^2)}{1 - r_0^2} = 1.143. \quad (5)$$

Абсолютное значение силы на пуансоне определяем, умножив значение относительного давления на величину напряжения текучести материала поковки и площадь пуансона:

$$P = q \cdot \sigma_s \cdot \pi \cdot R^2 = 0.578 \text{ МН}. \quad (6)$$

Воспользовавшись решением, полученным методом пластического течения, мы определили значение силы выдавливания в конкретный момент времени при определенной толщине дна. Для выбора формоизменяющего оборудования необходимо знать максимальное значение силы по ходу процесса, а значит рассчитать значения в нескольких точках, чтобы определить зависимость силы выдавливания по ходу и отыскать максимальное значение. Следует учесть, что вышеприведенная методика справедлива только при толщине дна, равной высоте очага пластической деформации H_c . Авторы других работ предлагают иное решение, полученное из условия минимума работы деформирования энергетическим методом [Оленин, 1972] и обладающее достаточной простотой для расчетов.

Расчет технологических параметров операции комбинированного выдавливания энергетическим методом [Оленин, 1972]

Условно весь процесс выдавливания делится на три стадии: начальную, стационарную и конечную. В начальный момент формируется очаг деформации, а при достаточно высокой заготовке — несколько очагов деформаций, что сопровождается интенсивным ростом силы выдавливания, которая к концу этапа достигает своего максимума, это наступает при толщине дна около 0.3 высоты заготовки. После истечения в каждую щель штампа объема металла, равного соответствующему очагу деформации, следует стационарная стадия, которая характеризуется постоянством силы выдавливания. С точки зрения накопления деформаций, стационарной стадии вообще не может быть. Возникает необходимость экспериментально подтвердить наличие стационарной стадии выдавливания.

Для изготовления выбранной нами детали требуется заготовка высотой около 26 мм, что значительно меньше высоты, при которой наблюдаются три стадии. Что позволяет воспользоваться упрощенной формулой для определения максимального удельного усилия на торце пуансона [Оленин, 1972].

$$p_{\max} = \sigma_s \cdot \left[\frac{D_0^2}{D^2} \cdot \ln \frac{D_0^2}{D_0^2 - D^2 + d^2} + \frac{H}{D} \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \right) \cdot \frac{D_0^2}{D_0^2 - D^2 + d^2} \right] \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 \cdot H} \right). \quad (7)$$

Формула справедлива для случая $H \leq D - d$.

С учетом того, что определено удельное усилие, максимальную силу на пуансоне определим с учетом площади поперечного сечения.

$$P_{\max} = p_{\max} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 1.006 \text{ МН}. \quad (8)$$

При величине очага деформации $0 \leq h \leq \frac{D-d}{2}$ можно воспользоваться формулой, полученной методом верхней оценки при допущении о постоянстве границы раздела течения на протяжении всего процесса деформирования, и определить величину удельного усилия на конечной стадии.

$$p_{III} = \sigma_s \cdot \left[\frac{3}{2} - \frac{d^2}{D^2} \cdot \left[1 + \frac{m_0}{2} \cdot \left(\frac{D_0}{D} - 1 \right) \right] + \frac{D_0}{2D} + m_0 \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \right) \cdot \frac{h}{D} \right] \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 \cdot h} \right). \quad (9)$$

Сила на пуансоне: $P_{III} = p_{III} \cdot \pi \cdot R^2 = 1.182 \text{ МН}$.

Значения, полученные с помощью двух различных методов расчета операций комбинированного выдавливания, отличаются практически в два раза, в связи с этим, для исследования и разработки операций холодного комбинированного выдавливания, авторами предлагается использовать современные программные продукты конечно-элементного моделирования, такие как DEFORM 3D ver.10.2. Данный метод имеет ряд преимуществ, которые были продемонстрированы в более ранних работах, посвященных комбинированному выдавливанию [Денищев, Коробова, 2010; Денищев и др., 2012].

Расчет технологических параметров операции комбинированного выдавливания с помощью DEFORM 3D

Пользуясь тем же набором исходных данных, создадим и проведем расчет операции комбинированного выдавливания. Заготовка — цилиндрическая диаметром 60 мм и высотой 26 мм, рисунок 3а. Параметры разбиения: 100000 конечных элементов тетраэдрической формы,

коэффициент разности между минимальным и максимальным КЭ принят 5. В качестве материала заготовки выбран аналог стали 10 — AISI 1010 из библиотеки стандартных материалов, модель материала жесткопластическая. Параметры кривой упрочнения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Кривая упрочнения аналога сталь 10

σ_s , МПа	$\dot{\epsilon}$, сек ⁻¹	
e	1	100
0	380	381
0.1	431.349	433.349
0.7	661.837	663.837
2	665	669

Инструмент — абсолютно жесткое тело, поэтому его расчет не производим. Матрица неподвижна, пуансон движется по оси Z со скоростью 5 мм/с. Трение на поверхностях контакта с инструментом было задано постоянным, фактор трения для стального инструмента при холодном деформировании принят 0.1. Ход пуансона 20 мм и разбит. Расчет разбит на 1000 шагов.

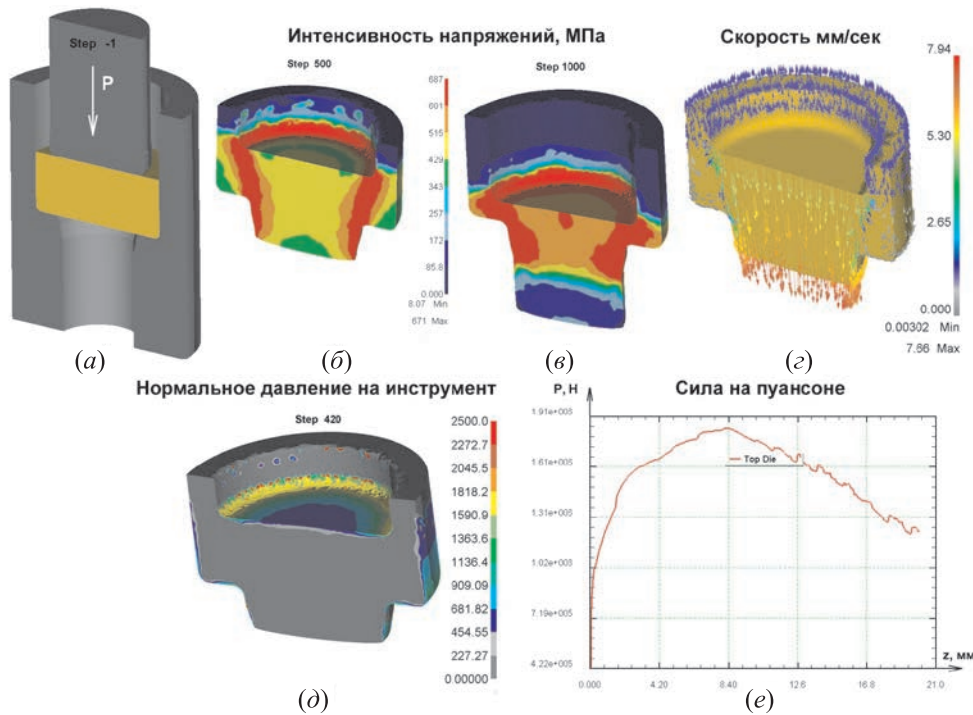


Рис. 3. Результаты расчета

В результате проведенного расчета было получено распределение интенсивности напряжений по объему заготовки на половине хода пуансона и в конце процесса, рисунки 3б и 3в соответственно. При помощи инструмента векторной визуализации можно проанализировать распределение скоростей течения материальных точек, расположенных в узлах конечно-элементной сетки рисунка 3г. Полученный график силы выдавливания (рис. 3е) отображает ход процесса деформирования. На графике четко видна начальная стадия процесса [Оленин, 1972], характеризующаяся ростом силы, которая достигает максимума при ходе пуансона 8.4 мм. После этого происходит заметное снижение нагрузки на пуансон, минимальное значение которой при ходе 20 мм составляет 1.2 МН. При этом давление на пуансон составляет в среднем 1300 МПа и достигает максимального значения до 2500 МПа на рабочих кромках пуансона и матрицы. В связи с тем, что рабочее давление находится в пределах 1800 МПа,

а максимальные значения имеют точечный характер и локализованы в узлах сетки, можно предположить, что завышенные узловые результаты связаны с грубым разбиением сетки и принятыми допущениями КЭ метода.

Как видно из результатов расчета, очаг пластической деформации локализуется в области, которая находится на поверхности вращения, образуемая которой соединяет рабочие кромки пуансона и очка матрицы. Стадия выдавливания с очагами прямого и обратного выдавливания, разделенными жесткой зоной, отсутствует. В зоне общего очага деформации имеют место сдвиговые деформации, даже при условии $D \gg d$ [Дмитриев, Воронцов, 2005]. Это предположение, сделанное по результатам компьютерного моделирования, требует дополнительных экспериментальных исследований.

Сравнение различных методов расчета операции комбинированного выдавливания

Проведя сравнение различных методов расчета операций комбинированного выдавливания, можно сделать вывод о значительном расхождении получаемых результатов. Прежде всего, это может быть связано с принимаемыми допущениями при выводе аналитического решения, а именно схематизацией очага пластической деформации, учетом свойств материала таких, как сопротивление пластическому деформированию при обратном и прямом выдавливании в зависимости от перемещения пуансона и общего протекания процесса. Расхождение получаемых данных возможно из-за неопределенности напряжения текучести в каждый момент времени, связанной с неравномерным распределением накопленных деформаций в штамповке.

Достоверными данными могут считаться только результаты физического эксперимента. При этом отметим, что достоверными могут быть результаты достигнутые при значительной точности соответствия начальных условий компьютерного моделирования физическим условиям процесса выдавливания.

Вывод

Разработка и уточнение полученных ранее решений для проектирования операций комбинированного выдавливания остаются актуальными в настоящее время. Новые возможности использования систем автоматизированного проектирования в сочетании с экспериментально-аналитическими методами позволят создать обоснованные методики для проектирования процессов комбинированного выдавливания полуфабриката с различной геометрией с применением специализированных малогабаритных прессов [Дмитриев, 2007; Дмитриев и др., 2012].

В настоящее время авторским коллективом ведется активная работа в данном направлении по экспериментальной верификации результатов компьютерного моделирования.

Список литературы

- Денищев Т. В., Дмитриев А. М., Коробова Н. В., Попов Н. Е. Исследование влияния технологических параметров на разностенность при комбинированном выдавливании крупногабаритных поковок типа «стакан» // Заготовительные производства в машиностроении. — 2012. — № 2. — С. 16–22.
- Денищев Т. В., Коробова Н. В. Исследование влияния схемы комбинированного выдавливания на разностенность // Инженерные системы. — 2010: Сборник трудов международной научно-практической конференции. — М., 2010. — С. 118–122.
- Дмитриев А. М. Специализированные прессы для обработки материалов давлением и их технологическое применение: учебное пособие / А. М. Дмитриев, Ф. В. Гречников, Н. В. Коробова. — Самара: Издательство Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. — 112 с.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Технологияковки и объемной штамповки. Часть 1. Объемная штамповка выдавливанием: Учебник для вузов по специальности «Машины и технология обработки металлов давлением». — М.: Машиностроение-1, 2005. — 500 с.

Дмитриев А. М., Коробова Н. В., Аксененко А. Ю., Толмачев Н. С. Технологичность конструкций создаваемых малогабаритных специализированных прессов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2012. — № 11. — С. 3–9.

Оленин Л. Д. Исследование процесса холодного комбинированного выдавливания: дисс. канд. техн. наук. — М: МАМИ, 1967. —167 с.

Оленин Л. Д. Расчет технологических переходов и конструирование инструмента для холодного выдавливания. — М.: Кузнечно-штамповочное производство №1, 1972.