

УДК 621.762

В.М.Горохов¹, О.В.Михайлов², М.Б.Штерн², А.Ф.Ильющенко¹¹Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси,²Институт проблем материаловедения НАН Украины

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ ТЕПЛОГО ПРЕССОВАНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЕЧНЫХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Методом компьютерного моделирования исследован процесс теплового прессования порошковых изделий сложной формы. Рассмотрено влияние схемы прессования на распределение конечной плотности изделий. Определена схема, обеспечивающая получение порошковых изделий с оптимальными свойствами.

Введение. В работе изучается влияние схемы прессования на конечные свойства блокировочных колец, являющихся элементами конструкции двигателя трактора "Беларус". Прессуемые детали относятся к числу наиболее ответственных, в силу чего к ним предъявляются повышенные требования, в частности, необходимо обеспечить максимальную равномерность распределения плотности.

Технология теплового прессования разработана в Институте порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси, г. Минск [1, 2]. Процесс уплотнения происходит в диапазоне изменения температур 120-150°C на оборудовании фирмы "Дорст" (Германия), с использованием специальных порошковых смесей повышенной уплотняемости фирмы "Хеганес" (Швеция). Сущность используемой технологии теплового прессования состоит в применении специальных пластификаторов, которые одновременно служат жидкой смазкой.

Несмотря на возможность достижения высокой плотности, при получении изделий, изображенных на рис.1, остается проблема управления ее распределением за счет выбора схемы прессования. Данная задача решается методом компьютерного моделирования.

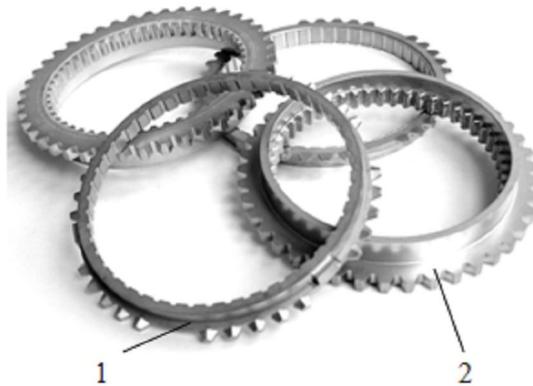


Рис. 1. Экспериментальные образцы синхронизатора трактора "Беларус":
1 - кольцо блокировочное; 2 - кольцо коническое

Схема прессования. Кольцо блокировочное представляет собой втулку с буртом, имеющую зубья на наружной поверхности и шлицы на внутренней. Высота зубьев неодинакова и уменьшается в направлении увеличения диаметра прессовки. Кроме того, внутренняя поверхность изделия имеет конусность. Схема прессования и положение формирующих элементов в начале и конце процесса уплотнения приведены на рис. 2.

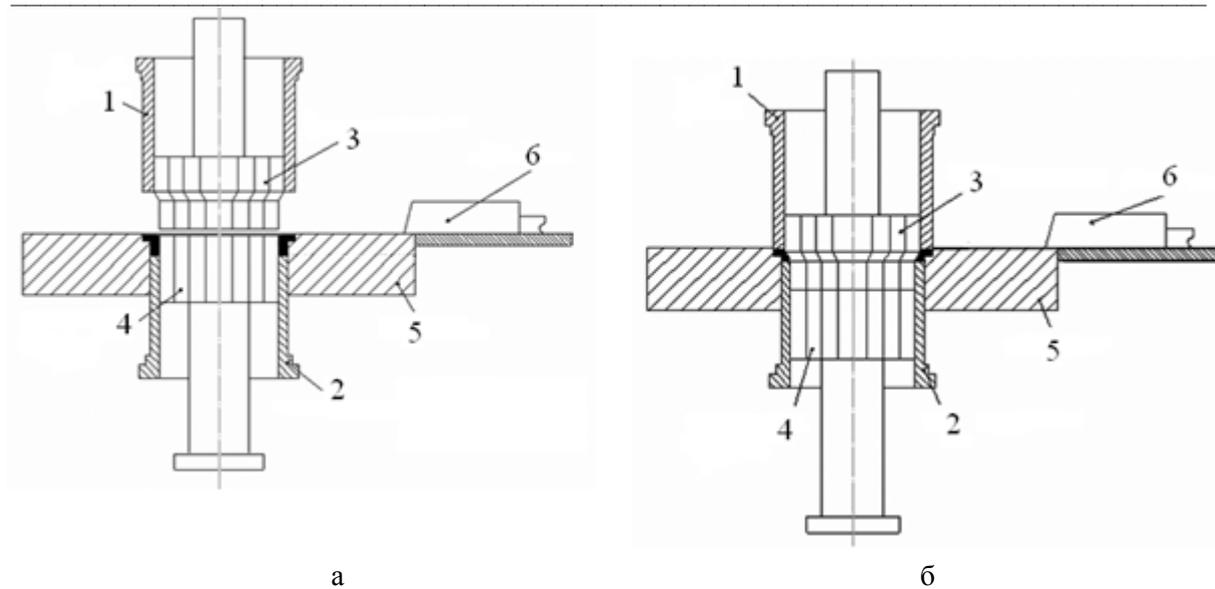


Рис.2. Положение формирующих элементов в начале (а) и в конце (б) прессования:
1 – верхний пуансон; 2 – нижний пуансон; 3 – пуансон-стержень; 4 – центральный стержень;
5 – матрица; 6 – ползушка

В начальный момент верхний пуансон 1 и пуансон-стержень 3 находятся в верхнем положении, происходит засыпка порошка. Затем они движутся вниз до контакта с центральным стержнем 4, после чего все три формирующих элемента перемещаются с одинаковой скоростью, как единое целое. Нижний пуансон 2 – неподвижен. Матрица 5 перемещается вниз со скоростью, отличной от скорости движения формирующих элементов 1, 3 и 4. Возникает задача определения оптимального соотношения скоростей формирующих элементов, обеспечивающего получение высокоплотных изделий с равномерным распределением свойств.

Математическая модель теплового прессования. В данной работе используется вариант теории пластичности пористых тел, предложенный в работах [3–6], в основе которого лежит представление о пластическом потенциале, как о функции компонентов тензора напряжений, которой в пространстве напряжений соответствует гладкая, выпуклая и замкнутая поверхность. На основе многочисленных экспериментальных и теоретических исследований он может быть представлен в форме модифицированного потенциала для Cam – Clay модели

$$F = \frac{\tau^2}{\varphi} + (1+m)^2 \frac{(p + \frac{m}{m+1} \bar{\rho} \sigma_s \sqrt{\psi})^2}{\psi} - \bar{\rho} \sigma_s, \quad (1)$$

где $p = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$, $\tau = \sqrt{(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})}$ – инварианты тензора напряжений: среднее давление и интенсивность касательных напряжений. Особую роль в дальнейшем изложении играют пористость θ или относительная плотность $\bar{\rho}$, связанная с пористостью очевидным соотношением $\bar{\rho} = 1 - \theta$. Согласно [7] в дальнейшем принимается, что $\varphi = (1 - \theta)^2$, $\psi = \frac{2}{3} \frac{(1 - \theta)^3}{\theta}$.

Параметр m характеризует как степень несовершенства контактов в порошковой заготовке, так и ее способность по разному сопротивляться растяжению и сжатию. В силу наличия смазки внутреннее трение в прессовке падает, что приводит к улучшению уплотняемости. В то же время степень схватывания между частицами порошка возрастает, в силу чего в дальнейшем предполагается, что $m = 0.1$.

Параметр σ_s характеризует напряжение течения непористой фазы пористого тела, понимаемой в дальнейшем как совокупность смазки и порошка. Изменение объема вследствие пластической деформаций оценивается в рамках данной модели скоростью изменения объема.

$$e \sim \frac{2(1+m)^2}{\psi} p + \frac{2m(1+m)\sigma_s}{\sqrt{\psi}} \quad (2)$$

Скорость изменения объема связана со скоростью изменения локальной плотности, которая в свою очередь связана с компонентами вектора скорости уравнением неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \cdot \operatorname{div}\vec{V} \quad (2a)$$

Та часть изменения объема, которая связана с возможным ростом пористости за счет появления новых пор, определялась по формуле $e \sim \frac{2m(1+m)\sigma_s}{\sqrt{\psi}}$.

Скорость накопления деформаций в непористой фазе пористого тела в рамках данной модели может быть определена на основе постулата В.В. Скорохода [7] об однозначности диссипативной функции

$$w = \sqrt{1-\theta} \left(-\frac{m}{1+m} \sqrt{\psi} e + \frac{\sqrt{(1+m)^2 \gamma^2 \varphi + e^2 \psi}}{1+m} \right) \quad (3)$$

Сама же величина накопленной пластической деформации, обозначаемая далее как ω , определяется путем решения дифференциального уравнения

$$\frac{d\omega}{dt} = w \quad (4)$$

Возможное деформационное упрочнение непористой фазы учитывали в соответствии с методикой, предложенной в работе [8].

Указанная математическая модель дополняется требованием экстремальности функционала

$$J(\vec{v}(x)) = \int_{\Omega} W \sigma_s d\Omega + \int_{\partial\Omega} p_i v_i d(\partial\Omega), \quad (5)$$

где произведение под знаком объемного интеграла представляет собой диссипацию энергии при пластическом деформировании порошковой заготовки.

Описанная модель используется для определения текущих значений ω и θ и их эволюции в ходе прессования в зависимости от сочетания движения различных элементов прессового оборудования.

Процедура решения сводится к пошаговому интегрированию уравнений (2a) и (4). Поля скоростей, фигурирующие в правых частях данных уравнения, определяются на основе метода конечных элементов на каждом шаге интегрирования. С этой целью используется требование экстремальности функционала (5) [9 – 12].

В силу симметрии рассматривали часть детали, ограниченную двумя радиальными плоскостями и образующими между собой угол 30° (рис.3). В качестве граничных условий принимали равенство нулю скоростей течения порошкового материала в направлении нормалей к этим плоскостям.

Считали, что нижний пуансон 3 неподвижен. Процесс прессования начинается после контакта пуансона - стержня с центральным стержнем, поэтому при моделировании рассматривали уплотнение цельным верхним пуансоном 1, перемещающимся со скоростью V_1 . Матрица перемещалась независимо со скоростью V_2 . Рассматривали различные отношения скорости верхнего пуансона к скорости матрицы. Учитывали также наличие трения между порошком и инструментом.

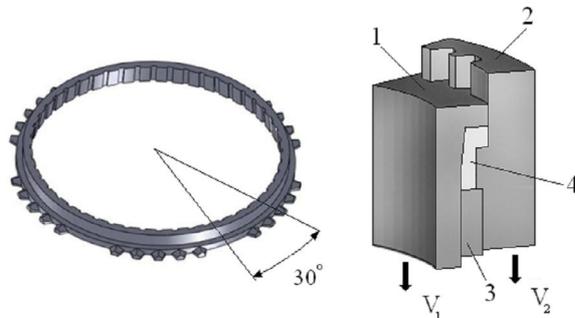


Рис.3. Расчетная схема:

1 - верхний пуансон; 2 - матрица; 3 - нижний пуансон; 4 - порошковая заготовка

Результаты моделирования. На рис.4 приведено распределение относительной плотности на последовательных этапах прессования. Отношение скорости верхнего пуансона к скорости матрицы выбиралось таким образом, чтобы конечная величина обжатия частей детали, имеющих разную высоту, была одинаковой. Угол конусности внутренней поверхности составлял 6.5° , отношение скорости верхнего пуансона к скорости матрицы $V_n/V_m = 1.475$, также полагали коэффициент трения $f_{тр.} = 0.1$.

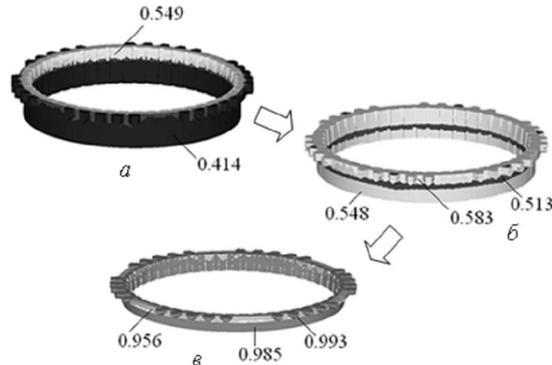


Рис.4. Распределение относительной плотности при оптимальной схеме уплотнения

Как видно, процесс прессования протекает в несколько этапов. На первом этапе происходит уплотнение внутренней поверхности прессовки конической поверхностью верхнего пуансона (рис.4,а). По мере перемещения верхнего пуансона зона уплотнения увеличивается в вертикальном и радиальном направлениях.

После контакта горизонтальной поверхности верхнего пуансона с прессовкой начинается второй этап прессования. Происходит уплотнение материала в вертикальном направлении. Более интенсивно уплотняются верхняя и нижняя, менее интенсивно – средняя части прессовки, что можно объяснить влиянием трения о стенки матрицы. Одновременно с осевым уплотнением продолжается радиальное уплотнение конической поверхностью верхнего пуансона.

В конце прессования распределение плотности по объему прессовки выравнивается, но остается неравномерным. Наиболее сильно уплотнены зубья (относительная плотность равна 0.993), причем плотность возрастает в направлении увеличения диаметра прессовки. Наименьшая плотность – в части фланца, не имеющей зубьев (0.956). Средняя величина плотности соответствует плотности ступицы (0.985).

На рис.5 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений относительной плотности для двух характерных сечений прессовки. Характер распределения плотности аналогичен.

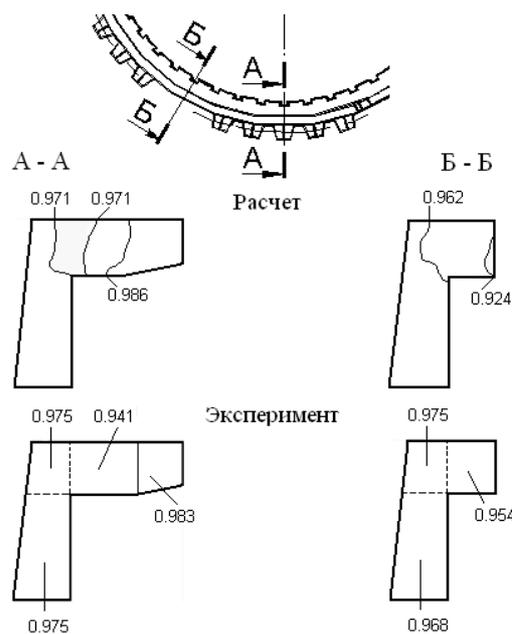


Рис.5. Сравнение расчетных и экспериментальных величин распределения относительной плотности

Полученное распределение плотности соответствует требованиям, предъявляемым к изделиям, поэтому рассмотренную схему уплотнения можно считать оптимальной.

Отношение скорости верхнего пуансона к скорости матрицы оказывает существенное влияние на протекание процесса прессования и на конечное распределение плотности. На рис.6 приведено распределение относительной плотности для двух схем прессования, у которых соотношение скоростей отличалось от оптимального.

Если отношение скоростей меньше оптимального (матрица движется быстрее, $V_{п}/V_{м} = 1.425$), то к моменту остановки верхнего пуансона высота фланца будет больше, чем необходимо. В результате наблюдается недостаточное уплотнение фланца и зубьев (рис.6,а). Плотность ступицы также меньше, что связано с увеличением общего конечного объема прессовки.

При отношении скоростей, большем оптимального (матрица движется медленнее, $V_{п}/V_{м} = 1.9$), наблюдается интенсивное уплотнение фланца и особенно зубьев. В то же время плотность ступицы мала (рис.6,б). В области зубьев и фланца происходит значительный рост напряжений, в результате общее усилие прессования возрастает.

Распределение плотности в двух последних случаях не соответствует предъявляемым требованиям, поэтому применения таких схем следует избегать.

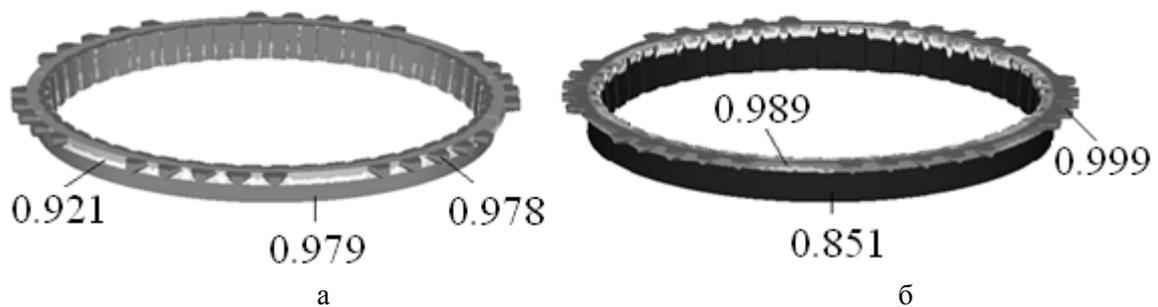


Рис.6. Распределение относительной плотности при отношении скорости верхнего пуансона к скорости матрицы:

а – меньше оптимального, б – больше оптимального

Выводы.

Распределение плотности в синхронизирующем кольце коробки передач трактора “Беларус”, полученном методом теплого прессования, зависит от отношения скорости верхнего пуансона к скорости матрицы.

Для получения изделий с равномерным распределением плотности отношение скоростей необходимо выбирать таким образом, чтобы конечная величина обжатия частей детали, имеющих разную высоту, было одинаковой. Такое отношение скоростей можно считать оптимальным. Однако и в этом случае наблюдается неравномерность распределения свойств, что обусловлено влиянием внешнего трения и сложной геометрической формой изделий.

При отношениях скоростей, отличающихся от оптимального, наблюдается недостаточное уплотнение отдельных частей деталей. Поэтому такие схемы прессования применять не рекомендуется.

1. Горохов В.М., Звонарев Е.В., Ильющенко А.Ф. Теплое прессование конструкционных изделий сложной формы из порошков низколегированных сталей // Наукові нотатки. - Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2007. – Вип. 20, С. 109-114.
2. Горохов В.М., Зарапина И.Г., Звонарев Е.В., Ильющенко А.Ф., Киреев П.Н. Структура и свойства низколегированных сталей, получаемых методами теплого и холодного прессования металлических порошков // Наукові нотатки. - Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2009. – Вип. 25, том.1. - С. 118-121.
3. Штерн М.Б. Определяющие уравнения для пластичных пористых тел// Порошковая металлургия. – 1981. - № 4 – С. 17-23.

4. Shtern M., Mikhailov O. Defects Formation in Die Compaction: Prediction and Numerical Analysis - In Proceeding of Powder Metalurgy European Congress (22 - 24 October, 2001), Nice, France, 2001. - Vol.3. - P. 50-57.
5. Штерн М.Б., Михайлов О.В. Контроль распределения плотности и предсказание разрушения при прессовании порошков в жесткой матрице на основе компьютерного моделирования - Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования: Сб. науч. тр. Института сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины, серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. - Киев, 2002. - С. 434-441.
6. Штерн М.Б., Михайлов О.В. Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы прессования на распределение плотности. I. Механическая модель уплотнения порошка // Порошковая металлургия. - 2002. - № 11/12. - С. 29-36.
7. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания. - К.: Наукова думка, 1972. - 140 с.
8. Ковальченко М.С. Деформационное упрочнение порошкового тела при прессовании // Порошковая металлургия. - 2009. - № 3/4. - С. 13-27.
9. Сердюк Г.Г., Михайлов О.В. Математическое моделирование пластического деформирования порошковых материалов при наличии свободной поверхности // Порошковая металлургия. - 1986. - № 4. - С. 18-22.
10. Михайлов О.В. Интегрированная система компьютерного моделирования процессов обработки порошковых изделий давлением// Порошковая металлургия. - 1995. - № 9/10. - С. 99-104.
11. Горохов В.М., Михайлов О.В., Устинова Г.П., Штефан Е.В. Система физического и геометрического моделирования процессов получения порошковых изделий с применением метода пластического деформирования// Порошковая металлургия (Минск). - 1997. - Вып. 20. - С. 5-10.
12. Михайлов О.В., Штерн М.Б. Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы прессования на распределение плотности. II. Методика моделирования и анализ схем формования // Порошковая металлургия. - 2003. - № 3/4. - С. 7-16.