

**О.С. Сергиенко, В.В. Лунев**

Запорожский национальный технический университет, Запорожье

**КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЛИКВИДАЦИИ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ  
ТИТАНОВЫХ ОТЛИВОК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ  
КОНФИГУРАЦИИ КОМПЕНСАТОРОВ**

Горячее изостатическое прессование (ГИП) – это прогрессивный метод ликвидации внутренних дефектов в литых заготовках. Применение ГИП увеличивает стоимость разработки технологии для новых деталей сложной геометрии из-за необходимости обработки многочисленных пробных партий отливок в процессе подбора оптимальной конфигурации компенсатора. Для сокращения затрат на разработку новой технологии рационально использовать математическое моделирование.

Для создания двумерной компьютерной математической модели результатов ликвидации пор в титановых отливках после ГИП использована демо-версия Comsol 4.3a. Для моделирования использован модуль Solid Mechanics, который позволяет объединить эффекты пластической деформации и ползучести по механизму Набарро-Херинга в нестационарных условиях, аналогично модели, предложенной в работах [1, 2].

Для упрощения математической модели принят ряд допущений.

- не учитывается влияние легирующих элементов на физико-механические свойства бета-титана;
- образцы нагреты равномерно по объему до температуры обработки ГИП;
- вместо изостатического давления рассматривается одностороннее воздействие на поверхность образца, к которой пора находится ближе всего;
- в порах отсутствует газ, потому не учитывается процесс диффузии газа в твердом металле в процессе ликвидации пор;

Для определения влияния ликвидации пор в процессе ГИП на геометрию образца в моделировании применяются образцы с единственной порой. Пустоты располагаются в центрах образцов длиной 100 мм каждый на различной глубине. Для сравнения результатов математического моделирования с данными реальных испытаний образцов из сплава ВТ5Л использованы поры диаметром (D) 2мм, 4мм и 6мм, расположенные на глубине (H) 2мм, 4мм, 6мм и 8мм.

По условиям математического моделирования образец имеет свойства бета-титана и нагрет до температуры 1050°C. Три стороны образца зафиксированы в пространстве, а к четвертой прикладывается давление 140 МПа. После окончания моделирования измерена высота результирующих углублений (h), данные измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1 Размеры результирующих углублений после ликвидации пор.

D, мм	2				4				6			
H, мм	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
h, мм	2,9	2,1	1,5	1,3	3,9	3,2	2,6	2,2	4,9	3,9	3,3	2,9

В ходе исследования испытывали компенсаторы в форме полусферы, конуса и цилиндра но оптимальной оказалась зеркальная конфигурация, размеры которой определяются параметрами результирующего углубления после ГИП отливки или образца. По сравнению с компенсаторами других форм, зеркальный компенсатор имеет минимальный расход металла и оставляет после ГИП минимальный объем для удаления с поверхности отливки. С другой стороны, максимальная эффективность зеркального компенсатора достигается при точном размещении над порой, что не всегда осуществимо.

Предложенная компьютерная математическая модель предназначена для ускорения и упрощения разработки технологии изготовления новых отливок. С учетом поправочного коэффициента математическая модель позволяет спрогнозировать размеры результирующих углублений после ГИП и разработать оптимальную конфигурацию компенсатора. Предложенная форма зеркального компенсатора теоретически является наиболее рациональной с точки зрения использования металла, а также экономии ресурсов и времени на удаление излишков металла с поверхности отливок.

### Список литературы

1. *P.L. Antona, C. Mapelli* Hot isostatic pressing (HIP): the state of the art & improvement of two steels // Metallurgical science and technology. – 2001. – №2. – С. 3-7
2. *М.Р. Орлов* Аналитическая оценка кинетики устранения пор в литых лопатках турбины при горячем изостатическом прессовании // Металловедение и термическая обработка металлов . – 2009. – №2 . – С. 17-20 .