

Компьютерная модель ликвидации внутренних дефектов титановых отливок для определения оптимальной конфигурации компенсаторов*

В среде Comsol 4.3a предложена компьютерная модель ликвидации внутренних дефектов титановых отливок, основанная на механизмах ползучести и растворения пор за счет диффузии вакансий. Представлены данные измерений результирующих углублений для пор различных размеров на разном расстоянии от поверхности образца. Предложена методика определения оптимальной конфигурации компенсатора при разработке технологии производства новых отливок.

Ключевые слова: горячее изостатическое прессование, компьютерная математическая модель, внутренний дефект, титан, компенсатор

Введение. Горячее изостатическое прессование (ГИП) – это прогрессивный метод ликвидации внутренних дефектов в литых заготовках, однако высокая стоимость оборудования и большие энергозатраты делают обработку ГИП нецелесообразной для простых деталей из недорогих сплавов. Наиболее рационально применение ГИП для отливок сложной конфигурации из никелевых жаропрочных и титановых сплавов, а также высоколегированных сталей.

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. По результатам компьютерного математического моделирования можно определить: размеры результирующего углубления после ГИП; оптимальное место размещения компенсатора; оптимальные размеры компенсатора для сокращения затрат металла; оптимальную форму компенсатора для сокращения затрат на удаление излишков материала после ГИП.

Анализ состояния проблемы. В различных литературных источниках рассматриваются математические модели устранения внутренних пор в отливках и изделиях порошковой металлургии. В работах [1, 2] представлены кинетические модели ликвидации внутренних дефектов, основанные на сочетании принципов пластической деформации и механизма растворения пор в результате диффузии вакансий. Исследователи используют линейные законы ползучести для расчета времени ликвидации пор. Однако расчет по формуле (1) затруднен определением значений энергии активации процесса ползучести и коэффициента пропорциональности.

$$\dot{\varepsilon}(t) = A \cdot \sigma(t) \cdot e^{\frac{Q}{RT}} \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}(t)$ – скорость ползучести; $\sigma(t)$ – напряжение, действующее в зоне расположения поры; Q – энергия активации процесса ползучести; R – универсальная газовая постоянная; T – температура ГИП; A – коэффициент пропорциональности.

В работе [3] предложена модель поведения шаровой поры в упругом пространстве под действием всестороннего давления. Представлены также области упругопластической деформации, возникающие около пор различной формы, однако теоретические исследования используют абстрактный материал без заданных физико-механических свойств.

В данной работе предложена модель ликвидации внутренних дефектов в титановых отливках, а также разработана оптимальная форма компенсатора, которая предотвращает нарушение геометрических размеров отливки после ГИП.

Материалы и методика эксперимента. Для создания компьютерной математической модели результатов ликвидации пор в титановых отливках после ГИП использована демо-версия Comsol 4.3a. Для моделирования использован модуль SolidMechanics, который позволяет объединить эффекты пластической деформации и ползучести по механизму Набарро-Херинга в нестационарных условиях, аналогично модели, предложенной в работе [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; вместо трехмерного образца рассматривается двумерная модель в плоскости, перпендикулярной к поверхности приложения давления.

Для определения влияния ликвидации пор в процессе ГИП на геометрию образца в моделировании

* По материалам X Международной специализированной выставки-конференции «Литье-2014» (27-29 мая, г. Запорожье)

применяются образцы с единственной порой. Пустоты располагаются в центрах образцов длиной 100 мм каждый на различной глубине. Для сравнения результатов математического моделирования с данными реальными испытаниями образцов из сплава ВТ5Л использованы поры диаметрами 2, 4 и 6 мм, расположенные на глубинах 2, 4, 6 и 8 мм.

По условиям математического моделирования образец имеет свойства бета-титана и нагрет до температуры 1050 °С. Три стороны образца зафиксированы в пространстве, а к четвертой прикладывается давление 140 МПа. Для повышения точности расчета использована сетка конечных элементов Extrafine, общее число которых по площади образца составляет 12400.

После окончания моделирования измерена высота результирующих углублений h , данные измерений приведены в таблице. Полученные в результате зависимости высоты результирующего углубления от расстояния H от поры до поверхности образца для пор разного диаметра D представлены на рис. 1. Конфигурация результирующего углубления после ликвидации поры диаметром 2 мм и на глубине 2 мм представлена на рис. 2.

Обсуждение результатов эксперимента. Результаты компьютерного математического моделирования подтверждают, что при увеличении расстояния от поры до поверхности образца высота результирующего углубления уменьшается, а его диаметр увеличивается. Моделирование позволяет сделать вывод, что металл поддается сдвигу под давлением по большей части поверхности, потому точно измерить диаметр результирующего углубления невозможно.

Размеры результирующих углублений по результатам компьютерного математического моделирования отличаются от результатов, полученных в экспериментах с образцами из сплава ВТ5Л. С учетом принятых при моделиро-

вании упрощений, необходимо ввести поправочный коэффициент $K = 0,1$. Коэффициент рассчитан как соотношение результатов измерений размеров результирующих углублений в образцах из титанового сплава и компьютерного моделирования.

На основании полученной компьютерной математической модели определили оптимальную конфигурацию компенсаторов. В работе [4] предлагается использовать компенсатор, размеры которого по вертикали в два раза превышают размеры поры, а по горизонтали превышают их в шесть раз. Компьютерная математическая модель позволяет подобрать более точные габариты компенсатора для каждой отливки.

По результатам компьютерного математического моделирования определили:

- высоту компенсатора нецелесообразно делать одинаковой по всей площади;
- компенсатор имеет максимальную высоту над центром поры, а к его краям высота плавно снижается до нуля;
- максимальная высота компенсатора превышает высоту поры не больше, чем в 1,5 раза; диаметр компенсатора должен быть максимальным, в

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

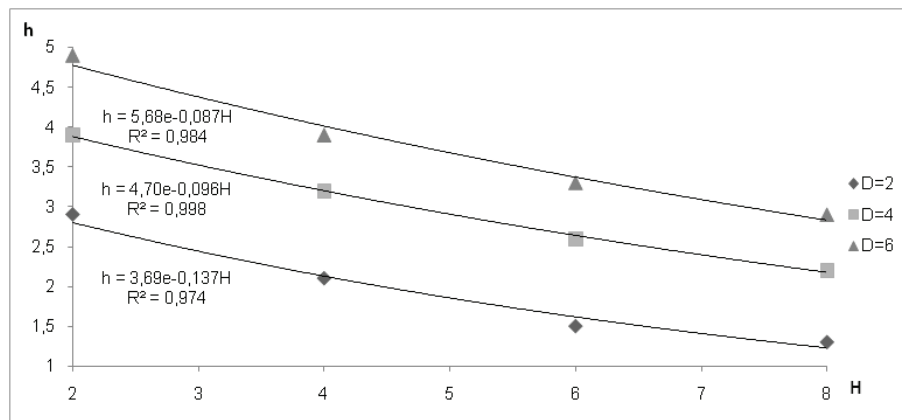


Рис. 1. Зависимость высоты результирующего углубления после ГИП от расстояния поры до поверхности образца для пор разного диаметра

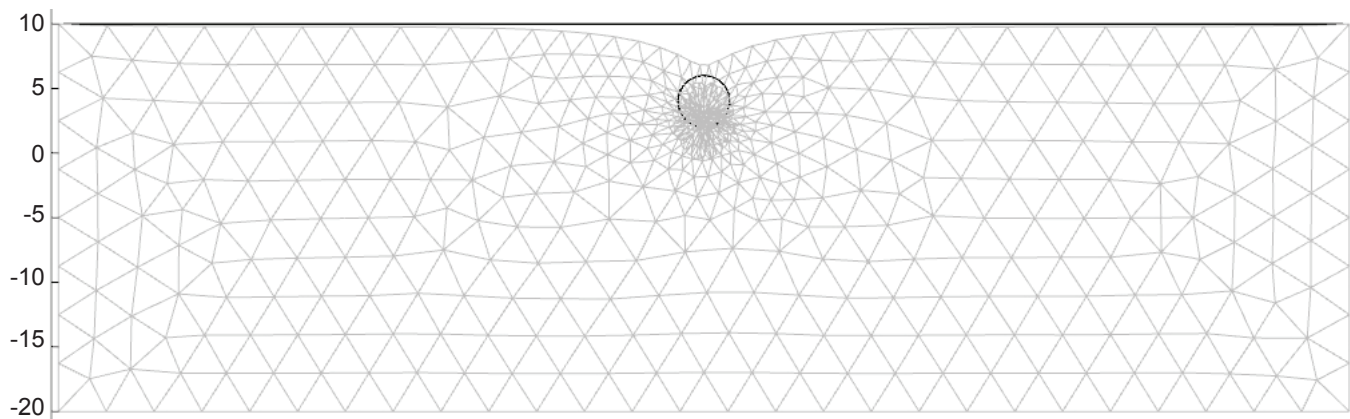


Рис. 2. Результаты математического моделирования ликвидации поры диаметром 2 мм и на глубине 2 мм

некоторых случаях он в 10-15 раз может превышать размеры поры.

В ходе исследования испытывали компенсаторы в форме полусферы, параллелепипеда, конуса, пирамиды, но оптимальной оказалась «зеркальная» конфигурация, размеры которой определяются параметрами результирующего углубления после ГИП отливки или образца (рис. 3).

По сравнению с компенсаторами других форм, «зеркальный» компенсатор имеет минимальный расход металла, 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.

Предложен следующий алгоритм получения оптимальной конфигурации зеркального компенсатора при разработке технологии для новых отливок, изготавливаемых по выплавляемым моделям:

- рентгеновский контроль тестовой партии отливок;
- определение расположения и размеров пор в отливках;
- ГИП тестовой партии отливок;
- компьютерное математическое моделирование ликвидации пор заданных размеров в отливках;

- изготовление модели компенсатора по форме результирующего углубления после ГИП;
- компьютерное моделирование ГИП с зеркальным компенсатором;
- корректировка размеров и формы компенсатора при помощи компьютерной математической модели;
- изготовление модели зеркального компенсатора для крепления на модели отливок.

Выводы

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.

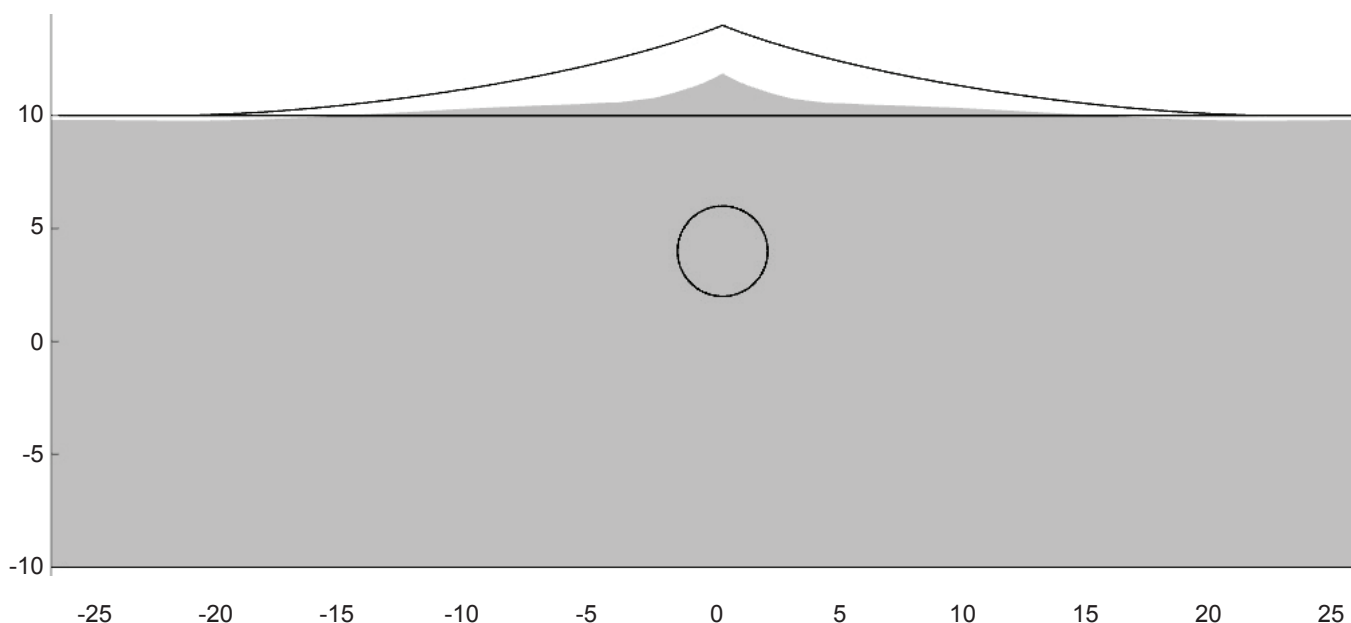
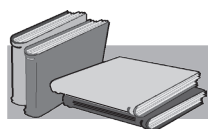


Рис. 3. Результаты ликвидации поры диаметром 2 мм и на глубине 2 мм с зеркальным компенсатором



ЛИТЕРАТУРА

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 Кинетика устранения пор в турбинных лопатках из жаропрочных никелевых сплавов методом горячего изостатического прессования // Всероссийская научная школа для молодежи «Материалы и энергосберегающие технологии для производства ответственных деталей высокоэффективных газотурбинных двигателей промышленных энергетических силовых установок и приводов». – Москва, 2010. – С. 55-60.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование влияния внешней нагрузки на поры в твердых телах / В. И. Бетехтин, С. Ю. Веселков, Ю. М. Даль и др. // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45. – Вып. 4. – С. 618-624.
4. Пат. № 18702, Україна, В22В 1/00. Спосіб виготовлення відливок по моделях, що виплавляються, з титанових сплавів / І. Д. Биков, В. Г. Клочихін, І. А. Розбігаєв, О. І Биков, І. Я. Кондратов. – Оубл. 25.12.1997, Бюл. № 6.

Анотація

Сергієнко О. С., Лунєв В. В.

Комп'ютерна модель ліквідації внутрішніх дефектів титанових виливків для визначення оптимальної конфігурації компенсаторів

У середовищі Comsol 4.3a запропоновано комп'ютерну модель ліквідації внутрішніх дефектів титанових виливків, засновану на механізмах повзучості і розчинення пор за рахунок дифузії вакансій. Представлено дані вимірювань результуючих заглиблень для пор різних розмірів на різній відстані від поверхні зразка. Запропоновано методику визначення оптимальної конфігурації компенсатору при розробці технології виготовлення нових виливків.

Ключові слова

гаряче ізостатичне пресування, комп'ютерна математична модель, внутрішній дефект, титан, компенсатор

Summary

Sergiienko O. S., Luniev V. V.

The computer removal internal titanium casts defects model for optimal configuration compensator test

Computer mathematical model for internal defects removal using Comsol 4.3a is described in the article. The model is based on mechanisms of creep flow and pore dissolution via vacancies diffusion. The data about resulting surface cavities for different pore sizes and depth is presented. The method for determining optimal compensator configuration while developing production technology of new castings is proposed.

Keywords

hot isostatic pressing, computer mathematical model, internal defect, titanium, compensator

Поступила 26.03.14