

УДК 621.78

Д.Г. Шерстюк¹, А.В. Кулик¹,
Е.А. Сошников², В.В. Харченко², В.С. Зевако²

¹Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

²Публичное акционерное общество «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения»

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6

У статті розглядаються характерні особливості та переваги застосування термомеханічного калібрування, як технології яка дозволяє забезпечити точність геометричних параметрів великогабаритних вісесиметричних конструкцій (обичайок).

Використання методу скінчених елементів (МСЕ), за допомогою числових методів вирішення в програмному середовищі ANSYS забезпечило отримання параметрів напружено-деформованого стану обичайок для уточнення параметрів технології термомеханічного калібрування.

Отримані результати моделювання та експерименту показали зростання величини напружень при деформації обичайки та відповідних залишкових напружень у випадках вихідної несиметричної еліптичності в порівнянні з симетричною конструкцією.

Ключові слова: термомеханічне калібрування, ANSYS, залишкові напруження, несиметрична еліптичність.

В статье рассматриваются характерные особенности и преимущества применения термомеханического калибрования как технологии обеспечивающей точность геометрических параметров крупногабаритных осесимметричных конструкций (обечаек).

Использование метода конечных элементов (МКЭ), с помощью численных методов решения в программной среде ANSYS обеспечило получение параметров напряженно-деформированного состояния обечаек для уточнения параметров технологии термомеханического калибрования.

Полученные результаты моделирования и эксперимента показали увеличение напряжений при деформировании обичайки и соответствующих остаточных напряжений в случаях исходной несимметричной эллиптичности по сравнению с симметричной конструкцией.

Ключевые слова: термомеханическое калибрование, ANSYS, остаточные напряжения, несимметричная эллиптичность.

The article discusses the characteristics and advantages of using the process of thermo-mechanical calibration as technology ensure the accuracy of large-scale axisymmetric structures (shells).

Using the finite element method (FEM) using the numerical methods of solution in a software environment ANSYS provided obtain parameters of the stress-strain state of shells to refine the technology of thermo-mechanical calibration.

The obtained simulation results and experimental results showed an increase in the magnitude of stress during deformation and corresponding residual stresses in cases of asymmetric ellipticity compared to the symmetric of the same magnitude.

Keywords: thermo-mechanical calibration, ANSYS, residual stress, unbalanced ellipticity.

Постановка проблемы

Определение ключевых факторов и особенностей процесса термомеханического калибрования – технологии обеспечивающей точность геометрических параметров крупногабаритных осесимметричных конструкций.

Введение

Крупногабаритные конструкции из алюминиевых сплавов в процессе изготовления подвергаются различным силовым и температурным воздействиям, в результате которых неизбежно возникают и накапливаются остаточные напряжения, приводящие к искажению выходных геометрических параметров. Термомеханическое калибрование является одним из наиболее эффективных методов восстановления геометрических размеров в соответствии с требованиями конструкторской документации.

Процесс термомеханического калибрования осуществляется в жестких чугунных оправках путем нагрева крупногабаритной конструкции до температуры 320°C, при которой сплав АМг6 обладает достаточно высокой пластичностью.

В основу процесса термомеханического калибрования заложено использование сил, возникающих при взаимодействии оправки и детали при нагреве их в печи, вследствие значительной разницы в коэффициенте температурного расширения материала детали ($\alpha_{\text{АМг6}}=26,5 \times 10^{-6}$ 1/град) и материала оправки ($\alpha_{\text{чуг}}=10 \times 10^{-6}$ 1/К) [1].

В результате силового взаимодействия детали с оправкой восстанавливается её форма и размеры.

Поскольку термокалибрование является термомеханическим процессом, оно также вносит свою долю в уровень и распределение остаточных напряжений в конструкции обечайки. Таким образом, исследование напряженно-деформированного состояния в процессе термомеханического калибрования позволит оценить степень влияния остаточных напряжений на этапах изготовления крупногабаритных конструкций и на их эксплуатационные характеристики. Использование современных методов математического моделирования и разработка метода контроля напряженно-деформированного состояния в процессе термомеханического калибрования обеспечит возможность объективно оценивать полученные данные и оказывать активное влияние на ход самого процесса.

Постановка задачи

Установить с помощью анализа исходных условий и математического моделирования характеристики напряженно-деформированного состояния

обечаек для уточнения и коррекции параметров технологии термомеханического калибрования.

Изложение основного материала

В данной работе исследовался процесс термомеханического калибрования обечаек, имеющих форму усеченного конуса с толщиной стенки 22 мм, сваренных из 2-х заготовок (рис.1).

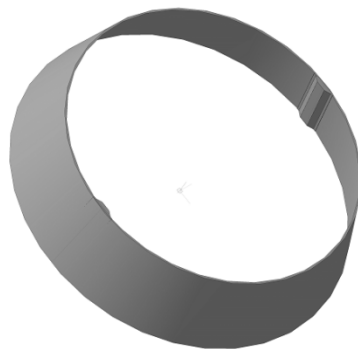


Рис. 1. Заготовка конической обечайки

Сложность и высокая стоимость создаваемых изделий, обуславливает актуальность проведения предварительного моделирования процесса термомеханического калибрования с целью уточнения её параметров при необходимости.

Напряженно-деформированное состояние обечайки наиболее полно описывает безмоментная теория оболочек [2].

Для математического моделирования процессов происходящих при термомеханическом калибровании наиболее целесообразно использовать программный комплекс ANSYS в связи с его широким распространением и приближенностью к реальным процессам в решении научных и инженерных задач.

С помощью модуля симуляции Mechanical модульной системы Workbench, ANSYS обеспечивает пользователя всеми необходимыми инструментами моделирования.

Программный комплекс ANSYS решает методом конечных элементов (МКЭ) стационарные и нестационарные, линейные и нелинейные задачи механики.

Для получения численного моделирования термомеханического калибрования, используя ANSYS, необходимо пройти несколько последовательных этапов подготовки и расчетов математической модели [2-3]:

- 1) идентификация задачи;
- 2) создание геометрии модели и задача материалов (Engineering Data);
- 3) разбивка модели обечайки и внешней технологической оправки на сетку конечных элементов;
- 4) задание граничных условий модели;
- 5) численное решение системы уравнений;
- 6) анализ результатов.

Процесс термомеханического калибрования крупногабаритных обечаек относится к классу задач Static structural (ANSYS), поскольку все задействованные элементы конструкции имеют малые перемещения от линейного расширения материалов вследствие нагревания.

В то же время, исследование напряженно-деформированного состояния не ограничивается только установлением напряжений и деформаций при самом процессе термомеханического калибрования, но также распространяется на предшествующий статистическому анализу этап – распределение температурных полей при конвекционном нагреве в печи и определение остаточных напряжений после окончания деформирования.

Таким образом, методика поиска численного решения математической модели термомеханического калибрования имеет четыре последовательных этапа (рис.2):

- 1) исследование конвекционного нагрева и поведения теплоносителя (воздуха);
- 2) статистический анализ (определение напряжений и деформаций) на основе распределения температурных полей;
- 3) моделирование остаточных напряжений на основе полученных напряжений и деформаций;
- 4) оценка адекватности модели.

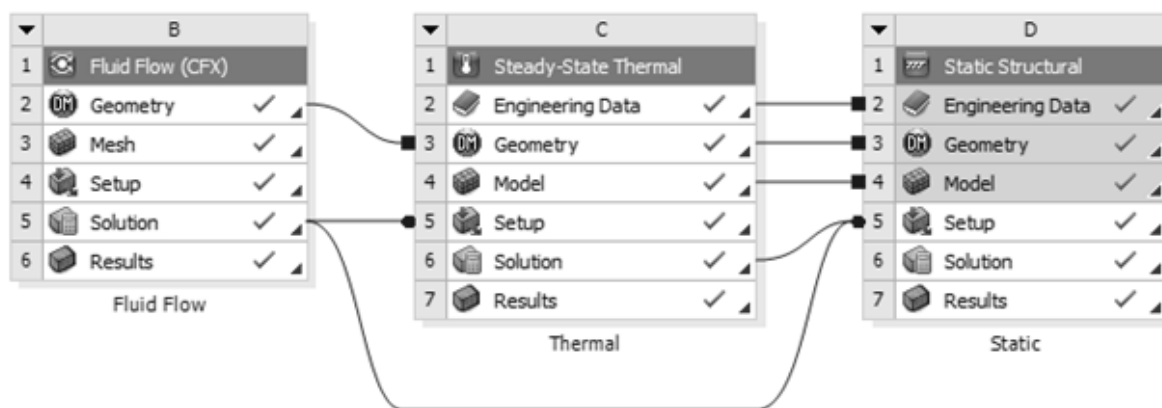


Рис. 2. Схема взаимосвязи модулей ANSYS последовательного определения тепловых полей и параметров напряженно-деформированного состояния обечаек

В процессе моделирования использовалась упорядоченная кубическая сетка с 8 узлами. Размер элемента сетки был принят равным 5см, обеспечивая 270 тыс. элементов и соответствующих им 470 тыс. узлов [4-5] (рис.3).

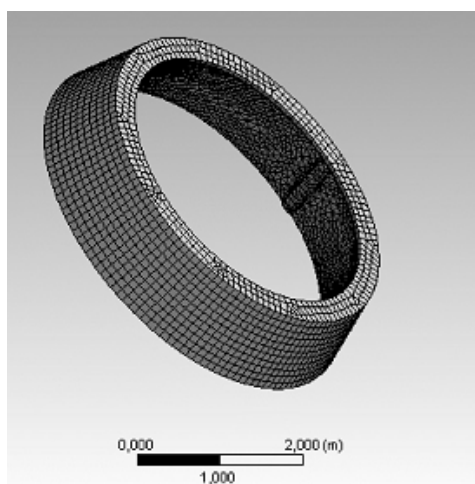


Рис. 3. Сетка конечных элементов для конической обечайки с технологической оправкой

В Workbench есть возможность локального изменения сетки. Более частая сетка нужна там, где можно ожидать большой градиент деформаций или напряжений, в областях, которые представляют особый интерес. В расчетном случае термомеханического калибрования сваренных полуобечайек областью особого интереса является балка функционального стыка и прилегающая к ней поверхность технологической оправки, показанные на рис.4. Функция локального изменения сетки – Refinement (уплотнение сетки) – повышает на 1-3 порядка количество элементов выбранной поверхности или ребра в сравнении с плотностью общей для тела сетки элементов.

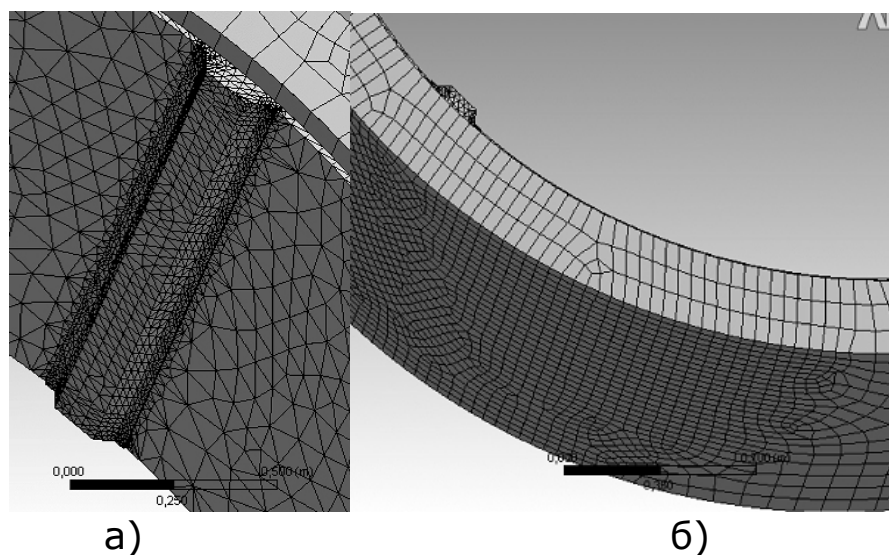


Рис. 4. Уплотненная сетка балки функционального стыка (а) и поверхностей технологической оправки (б)

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния было проведено первичное моделирование для симметричной эллипсности в районе балки и перпендикулярно оси балки.

Данные расчетные случаи были взяты, как наиболее вероятные и часто встречающиеся на практике.

Результаты моделирования приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Напряженно-деформированное состояние осесимметричных обечаек с нулевой величиной эллипсности в процессе термомеханического калибрования

Темп нагревания, °C/час	$T_{нач}, °C$	$\epsilon_t, \%$	$\sigma_e, МПа$	$\delta, мм$
125	20	0,0013- 0,0084	26,58- 1318,4	10,58- 17,63
	100	0,0036- 0,0084	54,85- 1318,4	11,58- 17,63
	200	0,0063- 0,0084	105,26- 1315,4	17,34- 17,63

$T_{нач}$ – начальная температура;

ϵ_t – температурная деформация;

δ – радиальные перемещения обечайки;

σ_e – эквивалентное напряжение (equivalent stress) или напряжение по Мизесу, определяется как $\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$,

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - напряжение по основным плоскостям.

При всех комбинациях начальной температуры и скорости нагрева, величины температурной деформации и эквивалентные напряжения имеют одинаковый характер распределения по изделию и схожи по максимальной величине, поскольку эти параметры зависят только от величины конечной температуры нагрева.

Отличие в начальных параметрах, при сходстве конечных результатов, сказывается на продолжительности проведения операции и, как следствие, времени достижения максимальных напряжений.

Таблица 2

Напряженно-деформированное состояние конической обечайки с различными величинами симметричной эллипсности

Эллиптичность, мм	σ_e , МПа	$\sigma_e^{\text{ост.}}$, МПа
0	1,1-1000	0,3-4,9
5	0,865-1060	0,2-3,8
10	1,1-1075	0,3-5
20	3,1-1115 (4558*)	0,2-14,6

σ_e – эквивалентное напряжение;

$\sigma_e^{\text{ост.}}$ – эквивалентные остаточные напряжения;

* – значение указывает на очаги максимальных напряжений.

Для значений эллипсности 0; 5; 10 мм эквивалентные напряжения имеют одинаковый характер распределения. При значении эллипсности 20 мм наблюдаются критические области эквивалентных напряжений, превышающие общий фон, рис. 5.

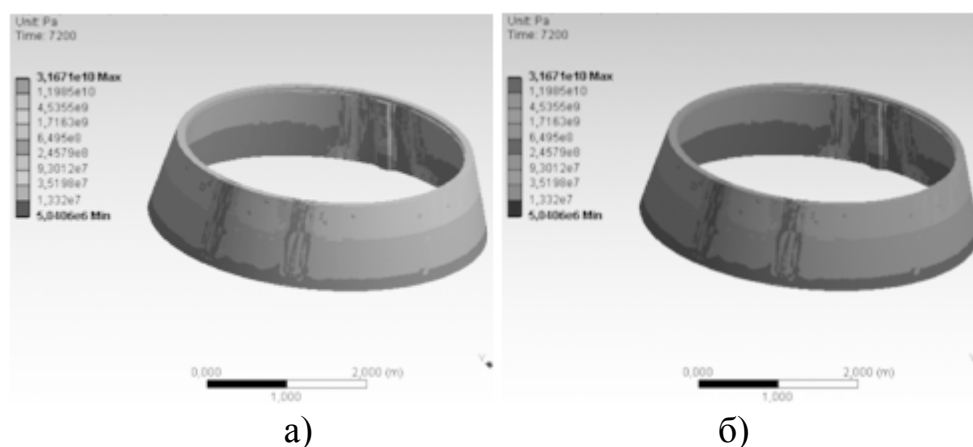


Рис. 5. Эквивалентные (а) и остаточные (б) напряжения обечайки с симметричной эллипсностью 20 мм в момент нагрева до 320°С

Полученные результаты моделирования стали основой экспериментальных исследований термомеханического калибрования обечаек в рамках бюджетных опытно-конструкторских работ ПАО «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения».

Целью экспериментальных работ было изучение напряженно-деформированного состояния при нагреве до температуры термомеханического калибрования и последующим остыванием до цеховой температуры.

Для измерений напряженно-деформированного состояния использовались высокотемпературные тензорезисторы НМТ-450 и

тензометрическая станция ZET017-T8. Тензорезисторы располагались на внутренней поверхности обечайки в местах наибольшей отрицательной эллипсности и максимального изгибающего момента, возникающего в процессе термомеханического калибрования. Расположение тензорезисторов было выбрано на основании результатов предварительного математического моделирования термомеханического калибрования.

Измерения проводились в непрерывном режиме в течение всего процесса термомеханического калибрования. Датчики фиксировали деформацию материала обечайки в местах своей установки.

Температурный режим термомеханического калибрования отслеживался по показаниям термопар, установленных непосредственно в печи в 6 зонах и по термопаре, установленной в самой массивной части технологической оправки.

На рис. 6 показаны исходные и конечные геометрические размеры обечайки до и после термомеханического калибрования, и расположение тензорезисторов.

Анализ исходной геометрии обечайки показывает, что имел место самый неблагоприятный случай формирования напряженно-деформированного состояния при термомеханическом калибровании: максимально допустимая эллипсность по балкам и несимметричная отрицательная эллипсность относительно балок.

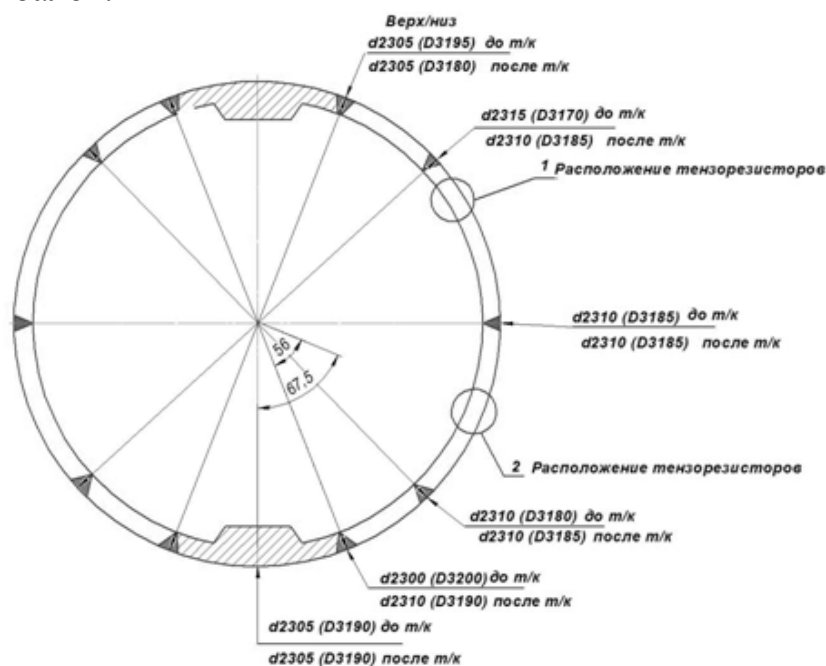


Рис. 6. Геометрические размеры обечайки до и после термомеханического калибрования и расположение тензорезисторов на внутренней поверхности обечайки

Созданная ранее модель была уточнена, отражая особенности геометрии реальной обечайки.

Для большей достоверности получаемых результатов помимо воспроизведения геометрических отклонений был также применен один из

методов уплотнения сетки – Sphere of Influence (рис. 7а), в местах локального искажения формы. В местах уплотнения сетки получено 350 тыс. конечных элементов и 550 тыс. узлов.

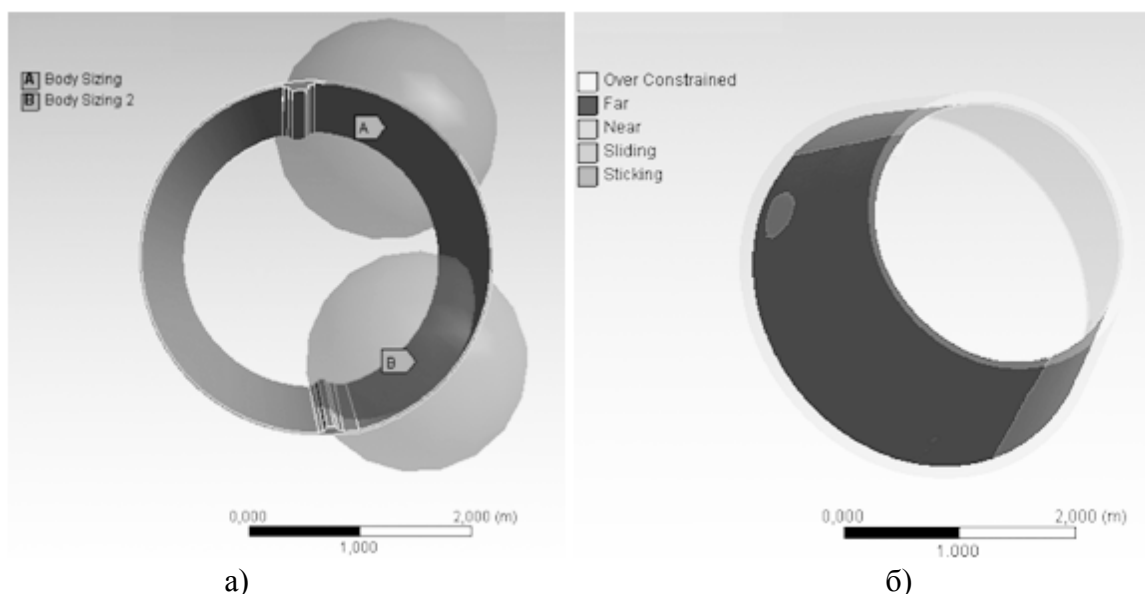


Рис. 7. Зоны локальной эллипсности и соответствующие им сферы уплотнения сетки (а), зоны контакта обечайки в районе балок в начальный момент нагрева (б)

В таблице 3 и на рис.8, для сравнения, представлены результаты моделирования и эксперимента.

Таблица 3

Расчетные значения деформаций и экспериментальные показания датчиков

Температура, °С	ε, %	Показания датчиков			
		Зона 2		Зона 1	
		Деформация, %	Напряжение, МПа	Деформация, %	Напряжение, МПа
250	1,4	1,44	574	1,507	634
320	2,4	3,37	1252	4,057	1756
270	0,78	0,893	356	0,82	345

ε – расчетные значения деформаций.

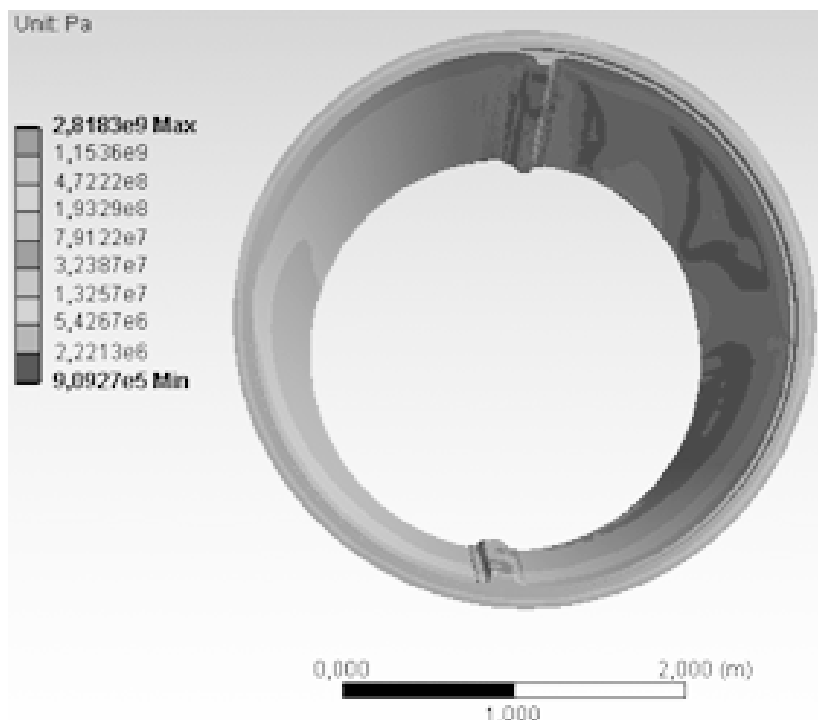


Рис. 8. Расчетные эквивалентные напряжения обечайки с несимметричной эллипсностью в момент нагрева до 320°C

Полученные экспериментальные результаты позволили установить, что в интервале температур $250...320...270^{\circ}\text{C}$ развиваются более значительные деформационные процессы, чем описываемые расчетной моделью. В то же время модель достаточно точно отражает процессы протекающие на этапе нагрева до 250°C и на этапе остывания после образования технологического зазора между обечайкой и оправкой при 270°C . Величины расчетных деформаций и показания датчиков практически совпадают. Выравнивание показаний датчиков при 270°C свидетельствует о том, что процесс термомеханического калибрования завершен и при этой температуре можно произвести отжиг для снятия остаточных напряжений. В эксперименте была произведена выдержка при 270°C в течении одного часа. На рис.9 представлено распределение расчетных остаточных напряжений после остывания до цеховой температуры. Величина остаточных напряжений $0,9...6,8$ МПа.

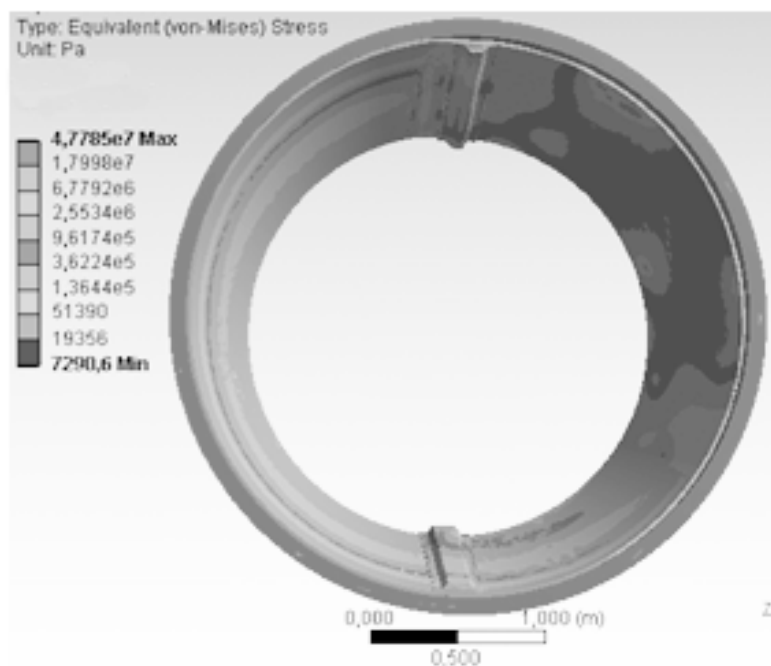


Рис. 9. Расчетные остаточные напряжения обечайки с несимметричной эллипсностью после охлаждения до цеховой температуры

Для сравнения величина остаточных напряжений, рассчитанных для условий охлаждения без промежуточного отжига при 270°C , может достигать 123 МПа, что составляет $\sim 80\% \sigma_{02}$.

Выводы:

Несимметричная эллипсность обечайки является наиболее сложным случаем геометрического отклонения формы.

Результаты эксперимента позволили установить, что фактически процесс термомеханического калибрования происходит в определенном температурном интервале $250 \dots 320 \dots 270^{\circ}\text{C}$.

Величина деформаций при термомеханическом калибровании значительно превышает расчетные значения, что свидетельствует о необходимости более глубокого изучения этого процесса.

Теоретическая модель адекватно, с достаточно высокой точностью, отражает процессы, происходящие на этапе нагрева до 250°C и на этапе остывания после образования технологического зазора при 270°C .

В интервале термомеханического калибрования данные моделирования и результаты эксперимента сопоставимы в отражении общего характера процесса.

Установлено, что промежуточный отжиг при 270°C , после завершения процесса термомеханического калибрования, позволяет снизить (согласно расчетов) остаточные напряжения до $0,9 \dots 6,8$ МПа.

Библиографические ссылки

1. Семенов Е.И. Ковка и штамповка. Справочник в 4-х томах. М. Машиностроение, 1984, с. 568
2. Балабух Л.И. Строительная механика ракет: Учебник для машиностроительных спец. вузов./Алфатов Н.А. - М.: Высш. шк., 1984. – 391 с.
3. Каплун А.Е., Морозов В.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство – М. Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
4. Ibid. ANSYS Operation Guide. Ibid. ANSYS Modeling and Meshing Guide. Ibid. ANSYS Structural Analysis Guide. Ibid. ANSYS Commands Reference.
5. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. / К.А. Басов – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

Надійшла до редколегії 20.04.2015