

УДК 621.78

Д.Г. ШЕРСТЮК¹, А.В. КУЛИК¹, А.М. МАЙ²¹ Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара² ГППО "Южмаш" им. А.М. Макарова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ КАЛИБРОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И КОНИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ РН «ЦИКЛОН-4»

В статье рассмотрено моделирование процесса нагрева в технологии термомеханического калибрования обечаек изделия 2Ц41ГБ, тонкостенных крупногабаритных конструкций головного аэродинамического обтекателя ракеты-носителя «Циклон-4». С использованием опыта применения технологии термомеханического калибрования для обечаек баков ракет-носителей и результатов моделирования, определены основные параметры математического моделирования процесса термомеханического калибрования. Построены характерные закономерности процесса нагрева и сформулированы рекомендации оптимального сочетания ключевых параметров технологии. Определены оптимальные режимы термомеханического калибрования, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала изделия и точность его геометрии.

Ключевые слова: термомеханическое калибрование, режимы нагрева, математическое моделирование, численные методы решения, ANSYS.

Введение

Технология термомеханического калибрования изделия 2Ц41ГБ, сварных обечаек главного обтекателя РН «Циклон-4» предназначена для повышения конечной точности обечаек путем нагрева изделия в жестком приспособлении и устранения эллиптичности и некруглости конструкции за счет взаимодействия обечайки и оправки в процессе температурного расширения их материалов. Подобный подход применялся для обечаек баков изделий, 15А18 только как технология отжига без учета особенностей конструкции обечайки и её подкреплений.

Тонкостенные крупногабаритные конструкции, такие как обечайки обтекателя РН «Циклон-4», требуют особого внимания к параметрам процесса нагрева, чтобы не допустить нежелательного деформирования элементов сложной конструкции обечаек, показанной на рис. 1.

Общее направление использования термомеханической обработки (ТМО) – увеличение пластичности или наоборот повышение упрочнения сплава за счет регулируемых внешних напряжений влияющих на строение сплавов.

В каждом конкретном случае ТМО сводится к оптимальной комбинации нескольких ключевых параметров [1]:

- 1) способ пластической деформации;
- 2) степень деформации;

3) совмещение термической обработки и пластической деформации;

4) скорректированные (в связи с использованием деформации) режимы термической обработки.

В работе [2] рассмотрена ТМО листовой деформированной заготовки. Даны общие рекомендации по выбору диапазонов технологических параметров ТМО (калибровки и отжига) для незамкнутых деформированных листовых заготовок, толщиной до 20 мм.

Полученные в работе [2] результаты позволяют оценить скорость деформации и усилия деформирования при термомеханической обработке листовых заготовок из алюминиевых сплавов.

В соответствии с технологическими рекомендациями по выбору режимов операций деформирования с нагревом листовую заготовку выдерживают в течении 30-60 минут при температуре 300°С. Для каждого режима дополнительно вводится начальная температура, которая может быть базовой – 20°С и температура предварительно прогретой печи (100-200°С).

Достаточно низкая скорость деформации и усилия деформирования – 10-20 МПа [2] обуславливаются длительным временем операции и малой величиной деформаций, которая рассчитывается как соотношение окончательного размера деформированного изделия к исходным размерам заготовки.

В работах [3-4] рассмотрены технологические принципы формоизменения трубных заготовок, в

режиме вязкого течения могут быть применены в производстве конических пустотелых тонкостенных деталей из анизотропных высокопрочных сплавов.

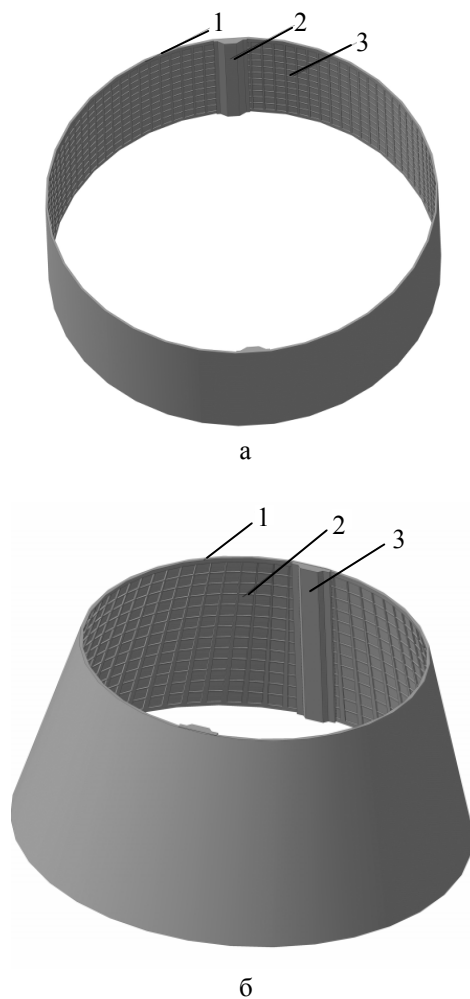


Рис. 1. Общий вид цилиндрической (а) и конической (б) обечаек с основными конструкциями и элементами (1 – торцевой шпангоут, 2 – подкрепление оболочки "вафельный фон", 3 – балка функционального стыка)

При разработке технологических процессов изотермического обжима и раздачи трубных заготовок из высокопрочных материалов, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, в настоящее время используют эмпирические зависимости из различных справочных источников, а также результаты теоретических исследований, в которых не в полной мере учитываются механические свойства материала. Во многих случаях это приводит к необходимости экспериментальной отработки операций изотермического обжима и раздачи, что удлиняет сроки подготовки производства изделия.

Из общей классификации существующих видов термомеханической обработки, созданной А.П. Гуляевым [5], наиболее подходящим для термомеха-

нического калибрования крупногабаритных обечаек подходит - низкотемпературная термомеханическая обработка ниже порога рекристаллизации. Данный вид ТМО, учитывая существующий опыт применения данной технологии, обусловлен небольшой величиной необходимой пластической деформации по отношению к диаметру изделия и температуре нагрева 350°C сплава АМг6, превышение которой ведет к потере коррозионной стойкости материала [6].

Таким образом, анализ основных исследований и публикаций позволяет определить предварительные диапазоны параметров процесса термомеханического калибрования: температура процесса $300-350^{\circ}\text{C}$, скорость деформации – 10^{-5} c^{-1} и усилие деформации – $10-20 \text{ МПа}$.

Тем не менее, специфика конструкции обечаек корпуса головного аэродинамического обтекателя РН «Циклон-4» не позволяет применить полученные результаты непосредственно и для использования термомеханической обработки данных обечаек необходимо провести дополнительные исследования.

Постановка проблемы

Определение оптимальных параметров нагрева, деформации и времени операции для термомеханического калибрования сварных крупногабаритных обечаек с элементами функционального стыка применительно к корпусу головного аэродинамического обтекателя РН «Циклон-4».

Изложение основного материала

Достоверность результатов во многом зависит от принятых начальных условий и особенностей процесса, а также ключевых параметров методов расчета.

В качестве материала изделий цилиндрической и конической обечаек для моделирования процесса нагрева были приняты: АМг6 (материал изделия) и СЧ-15 (материал оправки). Значение механико-физических параметров материалов оправки и изделия приведены в табл. 1.

Деформации обечаек во время нагрева можно принять равными $\epsilon=1\%$, (ϵ – продольная деформация, положительна при осевом растяжении, отрицательна при осевом сжатии) в силу незначительности геометрических отклонений после сварки по отношению к диаметру изделия. Таким образом, технологический зазор должен быть равен примерно $1\%(0,01)$ от значения диаметра заготовки, в пределах $15-20 \text{ мм}$.

Скорость деформации – изменение относительной деформации в единицу времени:

Таблица 1

Физико-механические свойства сплава АМг6 и литого чугуна СЧ-15 [7-9]

Марка сплава	$\sigma_{п}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	$E \times 10^4$, МПа	ρ , кг/м ³	α , кг/м ³	μ
АМг6	130-145	275-305	7,1	2640	24,7	0,32-0,36
СЧ15	130	150	6-8	6800-7200	10-11	0,28-0,29

$\sigma_{п}$ – предел пропорциональности, МПа; $\sigma_{в}$ – предел прочности, МПа; E – модуль упругости, МПа;
 ρ – плотность, кг/м³; α – коэффициент линейного температурного расширения, кг/м³;
 μ – коэффициент Пуассона

$$\varepsilon = \frac{D_1 - D_2}{D_2}, \quad (1)$$

$$U = \frac{\varepsilon}{T} (c^{-1}), \quad (2)$$

где ε – степень деформации; T – время.

Превышение величины D_2 над D_1 , как правило, находится в диапазоне 15-20 мм, вследствие сварочных деформаций [10], подставив в формулу (1) получим:

$$\varepsilon = \frac{D_1 - D_2}{D_2} = \frac{4090 - 4054,5}{4054,5} = 0,0088,$$

где D_2 и D_1 – конечный и начальный диаметр заготовки обечак в операции термомеханического калибрования.

Время (T) берется как время операции – 30-60 минут (1800-3600 с) из формулы (2) получаем скорость деформации для 30 минут (U_1) и для 60 – U_2 :

$$U_1 = \frac{\varepsilon}{T} = \frac{0,0088}{3600} = 2,7 \times 10^{-6} (c^{-1});$$

$$U_2 = \frac{\varepsilon}{T} = \frac{0,0088}{1800} = 5,5 \times 10^{-6} (c^{-1}).$$

Из полученных результатов расчета скорости деформации для технологического процесса термомеханического калибрования, время выдержки заготовок в печи можно принять в диапазоне 30-60 минут. Время прогрева алюминиевого сплава до заданной температуры, учитывая толщину изделия, может быть найдено по формуле, приведенной в табл. 2.

Таблица 2

Время нагрева алюминиевых и магниевых сплавов [11]

Сплавы	Диаметр или толщина заготовки в мм		
	До 50	Более 50 до 100	Более 100
Время нагревания в минутах 1 мм диаметра (толщины)			
Алюминиевые и магниевые	1,5	$T_1 = 1,5 + 0,01 (d - 50)$	2,0

$$T_1 = 1,5 + 0,01 (d - 50) = 1,5 + 0,01 (22 - 50) = 1,22,$$

т.е. обечайка с толщиной стенки 22 мм нагреется до необходимой температуры в соответствии с формулой

$$T_2 = T_1 d = 22 \times 1,28 = 26,84 \text{ мин.}$$

Таким образом, время операции (T_0) получаем сложив время прогрева металла до заданной температуры и время необходимое для деформации

$$T_0 = T_2 + T, \quad (3)$$

$$T_0 = T_2 + T = 26,84 + 60 = 87 \text{ мин.}$$

Достоверность параметров ТМО [1] может быть подтверждена диаграммой, показанной на рис. 2

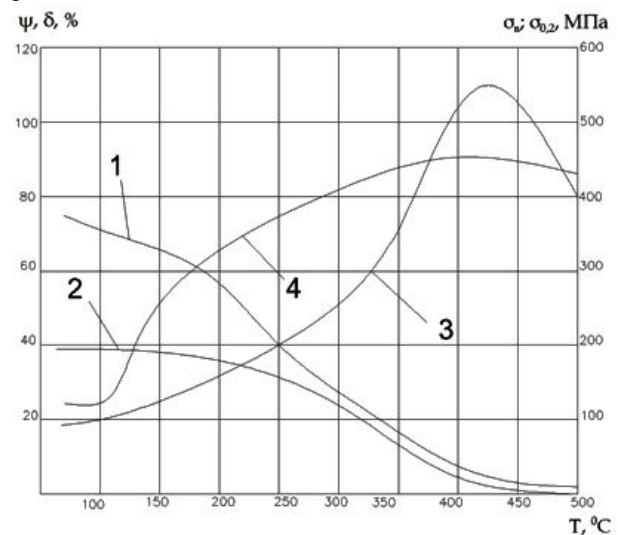


Рис. 2. Диаграмма деформирования сплава АМг6 в деформированном состоянии: 1 – $\sigma_{в}$; 2 – $\sigma_{0,2}$; 3 – δ (относительное удлинение при разрыве); 4 – ψ (относительное сужение) [13]

Сопротивление деформации алюминиевого сплава АМг6 при температуре 300°С и скорости деформации $u < 1 \times 10^{-4}$, (рис. 3) дает величину не превышающую $\sigma = 5-14 \text{ кгс/мм}^2 = 50-140 \text{ МПа}$.

Характеристику временного сопротивления $\sigma_{в}$ после горячей обработки давлением можно также

получить с помощью эмпирической формулы для деформируемых алюминиевых сплавов (АМг1-6, Д16) [14]:

$$\sigma_B = \sigma_{B \text{ исх.}} + 1,6\epsilon^{0,76} \quad (4)$$

Для АМг6, при $\sigma_{B \text{ исх.}}=290$ МПа[7]:

$$\sigma_B = 290 + 1,6 \times 10^{0,76} = 300 \text{ МПа.}$$

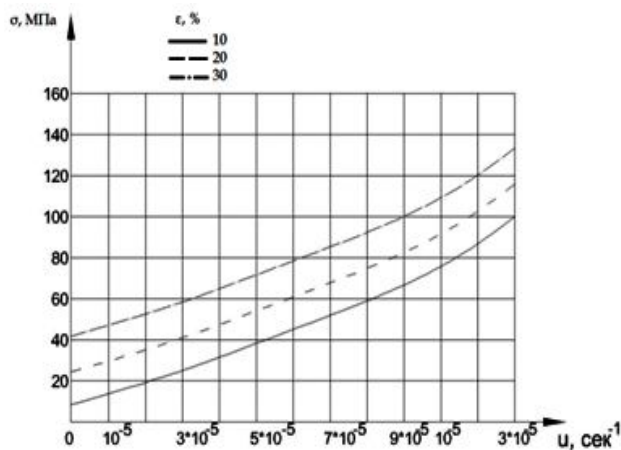


Рис. 3. Сопротивления деформации сплава Амг6 при температуре 300°C [14]

Расчетные параметры технологического процесса термомеханического калибрования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Технологические рекомендации для процесса термомеханического калибрования цилиндрических и конических обечаек

Материал	T, °C	U, 1/c	$\tau_{\text{мин.}}$, мин.	σ_y , МПа	τ , мин.
АМг6	300-330	$2,7 \times 10^{-4}$ - $5,5 \times 10^{-4}$	26,84	50-140	90-120

T – температура, °C; U – скорость деформации, 1/c;
 $\tau_{\text{мин.}}$ – минимальное время прогрева, мин.;
 σ_y – удельное усилие, МПа;
 τ – время операции, мин.

Технологический зазор между оправкой и изделием принимается около 1% от значения диаметра

заготовки, на основании величины возможных деформаций $\epsilon=1\%$, в пределах 15-20 мм.

Размер технологической оправки для цилиндра: высота H=1300 мм, толщина h=30 мм, для конуса – H=1020 мм, h=30 мм. Данные размеры технологической оправки обусловлены максимально возможным температурным расширением алюминия

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T. \quad (4)$$

Максимально возможный прирост размера обечайки вследствие температурного расширения при нагреве до 330°C составляет:

$$\Delta R = \alpha \times R \times \Delta T = 24,7 \times 10^{-6} \times 2026 \times 310 = 30 \text{ (мм).}$$

Оптимизационное численное моделирование конструкции оправки проводилось отдельной серией экспериментов.

Моделирование режимов нагрева: замедленного, обычного, скоростного, является обоснованным решением в силу успешного применения данных схем нагрева к самым разнообразным изделиям и материалам.

Поскольку масса и объем чугунной оправки в несколько раз больше массы и объема обечайки, учитывая процессы теплообмена, то именно по ней следует рассчитывать параметры нагрева. Чугунные литые конструкции, имеющие значительные габариты и толщину стенок, как правило, нагревают со скоростью 50-150°C [11], что соответствует замедленному(вместе с печью) при скорости 50°C, либо обычному режиму нагрева со скоростью 150 °C/час. Графики различных режимов нагрева представлены на рис. 4.

Технологическая оснастка представляет собой конус (либо цилиндр в случае цилиндрической обечайки) большего, чем обечайка диаметра на величину технологического зазора. Простота принятого вида оснастки объясняется её необходимостью уделить максимальное внимание поведению обечаек во время термомеханического калибрования и их напряженно-деформированного состояния.

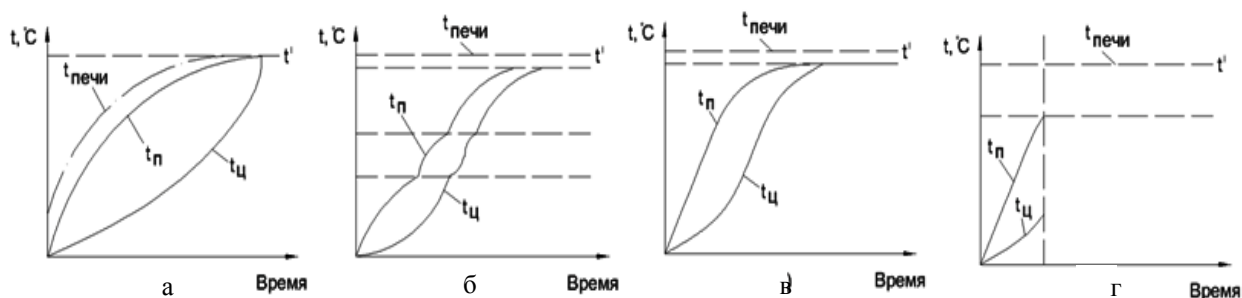


Рис. 4. Графики режимов нагрева: а – замедленный (с печью); б – ступенчатый; в – обычный; г – скоростной, где t' – необходимая температура нагрева, t_n – температура поверхности нагреваемой детали, t_ц – температура в центре детали

Обечайка, как предмет исследования, берется для расчетов без каких-либо упрощений конструкции.

С помощью модуля Engineering Data, программной среды ANSYS, задано изменение механических параметров материалов от температуры во вкладыше Tabular Data, кроме указанных в таблице 1 фиксированных значений.

Для получения численного моделирования термомеханического калибрования, используя ANSYS необходимо пройти несколько последовательных этапов подготовки и расчетов математической модели. Такими этапами есть [15-16]:

- 1) создание трехмерной модели и задание свойств материалов (Engineering Data);
- 2) нанесение сетки конечных элементов – с помощью метода Hex Dominant создается упорядоченная сетка, которая имеет преимущество против произвольной;
- 3) задание начальных и конечных условий расчета;
- 4) численное решение системы уравнений;
- 5) анализ результатов.

Процесс термомеханического калибрования крупногабаритных обечаек относится к классу задач Static structural (ANSYS), поскольку, все задействованные элементы конструкций или жестко закрепленные, как технологическое оснащение, или имеют малые перемещения от линейного расширения материалов вследствие нагрева.

После внесения начальных параметров и свойств процесса в математическую модель производится серия расчетов с последующим анализом результатов.

Исходные данные и результаты моделирования комбинаций начальных условий в 18 расчетных случаях представлены в табл. 4.

Диапазон представленных основных параметров деформирования показывает их рост от начального этапа операции – прогрева печи (мини-

мальное значение) и итоговый показатель (максимальное значение) – операция термомеханического калибрования. Приведенные значения являются средним для изделия и технологической оправки. Характер распределения температурной деформации, эквивалентного напряжения и общих деформаций представлен на рис. 4-6 – среднее по изделию.

При всех комбинациях начальной температуры и скорости нагрева в печи, величины температурной деформации и эквивалентного напряжения имеют одинаковый характер распределения по изделию и совпадают по максимальной величине, поскольку оба параметра зависят только от величины конечной температуры нагрева.

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

Характер распределения эквивалентного напряжения для цилиндрической и конической обечаек приведен на рис 5.

Конечные результаты общих деформаций, представленные в табл. 3, являются средними значениями.

Деформации цилиндрической обечайки имеют одинаковый характер по принципу распределения, отличаясь только по величине в критических точках, при всех взятых для анализа режимах нагрева (рис. 6).

Деформации, в случае конической обечайки, имеют одинаковый характер принципа распределения для обычного и ускоренного режимов (рис. 7б, 7в) и несколько отличаются для случаев замедленного нагрева (7а). Данная особенность распределения деформаций объясняется, в случае конической обечайки, наклонной плоскостью оболочки, в основании которой сосредоточены наибольшие деформации и напряжения.

Таблица 4

Изменение напряженно-деформированного состояния обечаек от изменения параметров деформирования

m, °C/час	T _{нач} , °C	Цилиндрическая обечайка			Коническая обечайка		
		ε _t , %	σ _ε , МПа	δ, мм	ε _t , %	σ _ε , МПа	δ, мм
50	20	0,001-0,0084	13,1-127,85	9,92-18,92	0,001-0,0084	13,83-131,84	9,9-17,32
	100	0,0025-0,0084	39,51-1278,5	10,03-18,92	0,0026-0,0084	40,47-131,84	11,39-17,63
	200	0,054-0,0084	78,06-127,85	11,4-18,92	0,0054-0,0084	80,16-131,84	13,42-17,63
125	20	0,0021-0,0084	26,37-127,85	9,98-18,92	0,0013-0,0084	26,58-131,84	10,58-17,63
	100	0,0037-0,0084	52,53-127,85	10,69-18,92	0,0036-0,0084	54,85-131,84	11,58-17,63
	200	0,0063-0,0084	103-127,85	12,95-18,92	0,0063-0,0084	105,26-131,54	17,34-17,63
200	20	0,0025-0,0084	39,46-127,85	10,4-18,92	0,0025-0,0084	41,41-131,54	10,63-17,63
	100	0,0048-0,0084	77,95-127,85	10,83-18,92	0,0046-0,0084	80-131,84	12,54-17,63
	200	0,0065-0,0084	113-127,85	13,95-18,92	0,0065-0,0084	117,31-131,84	14,26-17,63

m – темп нагрева; T_{нач} – начальная температура; ε_t – температурная деформация; δ – общая деформация; σ_ε – эквивалентное напряжение

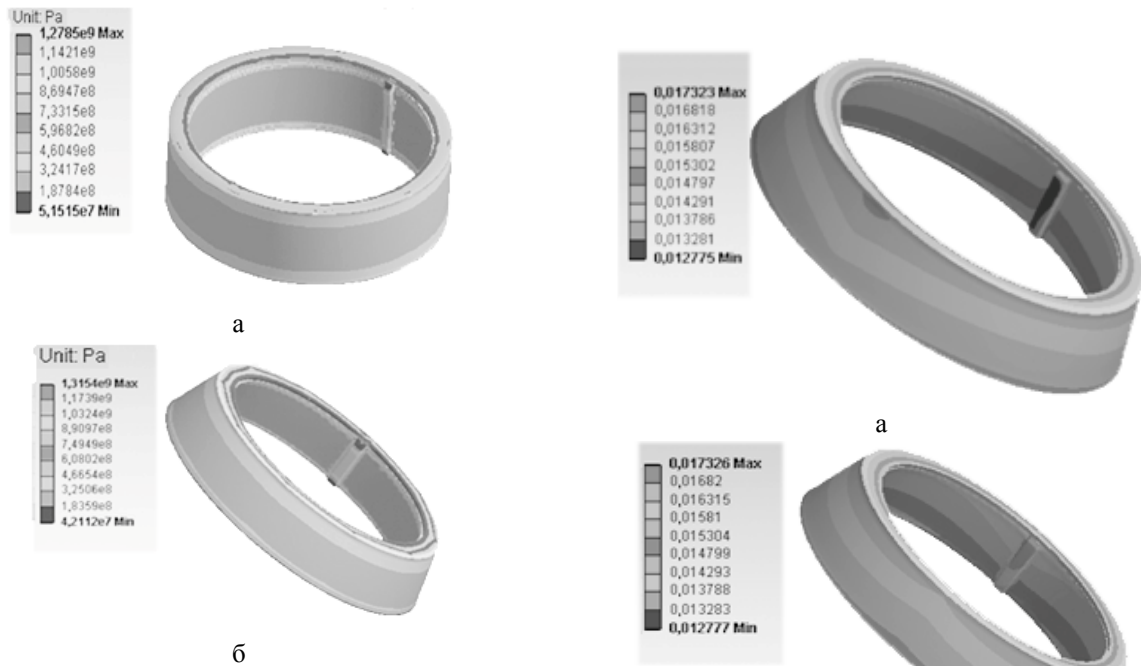


Рис. 5. Эквивалентные напряжения цилиндрической (а) и конической (б) обечайки и оправки при начальной температуре печи 100°С и темпе нагрева 50°С/час



Рис. 6. Распределение деформации цилиндрической обечайки и оправки при темпе нагрева 125°С/час и начальных условиях 20°С(а), 100°С(б) и 200°С(в). Единица измерения на приведенных рисунках - "метр"

Рис. 7. Распределение деформации конической обечайки и оправки:

а – темп нагрева 50°С/час, начальная температура 20°С, б – темп нагрева 125°С/час, начальная температура 20°С, в – темп нагрева 200°С/час, начальная температура 20°С. Единица измерения на приведенных рисунках – "метр"

Прослеживается зависимость процесса термомеханического калибрования от начальной температуры печи. Взяв для примера замедленный режим нагрева(50°С/час), разница деформаций, зависящая от начальной температуры, составляет – 35-40%, сравнивая начальные условия 20°С и 200°С начальной температуры печи.

Зависимость от режима нагрева имеет меньшие величины. Различие максимальных деформаций при замедленном и ускоренном режиме нагрева (200°С/час) составляют 16-20%.

Зависимость напряжений и деформаций от

температуры и времени при темпе нагрева $125^{\circ}\text{C}/\text{час}$, показана рис. 8-9.

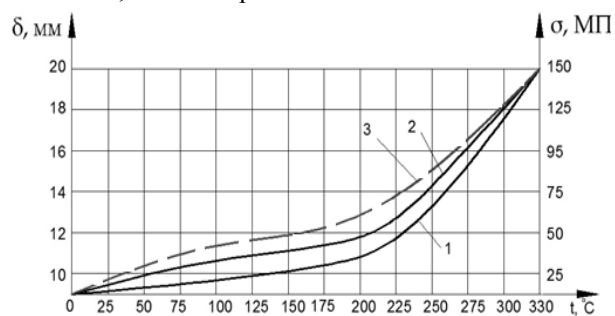


Рис. 8. Зависимость деформации и напряжений цилиндрической и конической обечаек от температуры: 1 – начальная температура 20°C ; 2 – начальная температура 100°C ; 3 – начальная температура 200°C

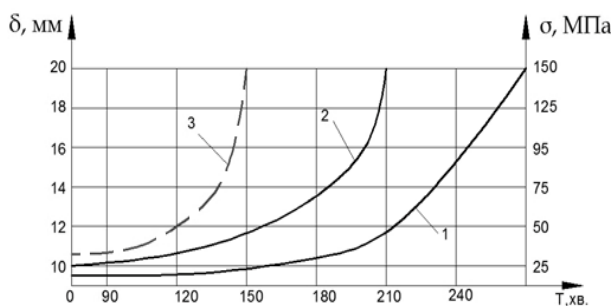


Рис. 9. Зависимость деформаций и напряжений цилиндрической и конической обечаек по времени: 1 – начальная температура 20°C ; 2 – начальная температура 100°C ; 3 – начальная температура 200°C

После нанесения вафельного фона и приварки торцевых шпангоутов обечайки подвергаются отжигу в твердых приспособлениях.

Режимы нагрева, полученные при моделировании термомеханического калибрования, могут быть применены для операций отжига, предотвращая появления остаточных напряжений и нежелательную деформацию вафельного фона обечаек. Необходимость корректировки режимов нагрева и точного определения величины и расположения зон эллиптичности подтверждается математическим моделированием (рис. 10) [17] и проведением пробного отжига в цехе ГП ПО "Южмаш" им. А.М. Макарова (рис. 11) [18].

Расчетно-теоретические показатели технологии термомеханического калибрования на основе математического моделирования, имеют высокую достоверность, совпадая по итоговым параметрам точности с обмерами обечаек после термомеханического калибрования в цехе ГП ПО "Южмаш" им. А.М. Макарова [19].

Полученные результаты моделирования термомеханической обработки частей обтекателя и построенные по ним характерные закономерности

процесса дают возможность для формирования выводов об оптимальных параметрах нагрева в технологии термомеханического калибрования и отжига обечаек головного аэродинамического обтекателя РН «Циклон-4».

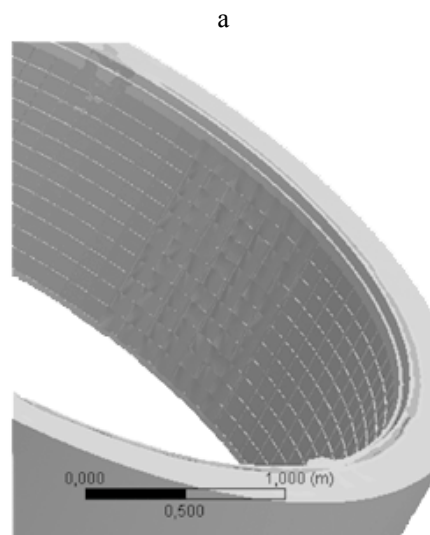
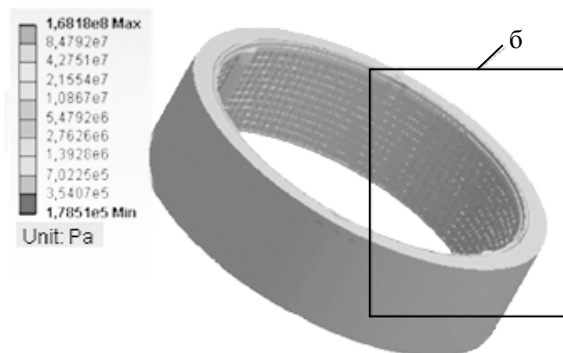


Рис. 10. Распределение остаточных напряжений в процессе термомеханического калибрования при эллиптичности цилиндрической обечайки 20 м0м (а, б) в районе балки [17]

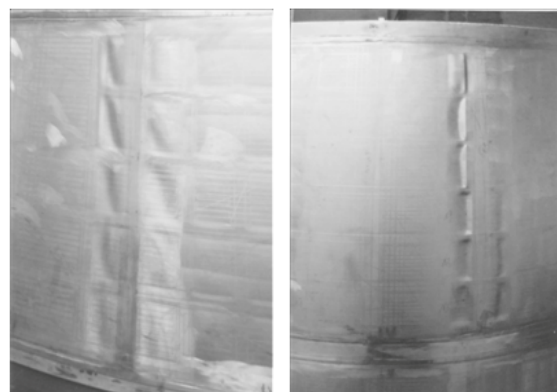


Рис. 11. Деформация обечаек (а, б) в местах максимальной эллиптичности(32 мм) после проведения отжига

Выводы

Ключевые параметры напряженно-деформированного состояния обечаек головного аэродинамического обтекателя РН «Циклон-4» зависят от конечной температуры нагрева и скорости нагрева, и связанного с ними времени проведения операции.

Температура процесса термомеханического калибрования для всех обечаек принимается равной $330 \pm 15^\circ\text{C}$, как наиболее оптимальная, обеспечивающая оптимальные показатели физико-механических свойств материала обечаек. Временной диапазон операции термомеханического калибрования крупногабаритных обечаек находится в пределах 2-2,5 часов, что является достаточным временем для исправления всевозможных отклонений геометрии обечаек.

Предельно низкая скорость нагрева, обусловленная возможностями печи и максимальная скорость нагрева дают неудовлетворительный результат в отношении длительного времени проведения операции, в первом случае, и предельно высоких напряжений изделия, не давая прогреться изделию и оправке, во втором.

Таким образом, скорость нагрева в $125^\circ\text{C}/\text{час}$ является оптимальной, сочетая разумную длительность времени проведения операции и вполне допустимый уровень напряжений на изделии и оправке.

Как и в случае со скоростью нагрева обечаек начальная температура прогрева печи также имеет оптимальное значение, но в данном случае желательным является как раз максимальная величина – 200°C .

Также, в процессе проектирования и обработки технологии термомеханического калибрования необходимо учесть, что в зонах эллиптичности 20 и более миллиметров для всех типов цилиндрических или конических обечаек, в процессе обеспечения точности путем термомеханической обработки происходят нежелательные деформации и создаются очаги остаточных напряжений, которые достигают критических величин, превосходя предел пластичности материала.

Исходя из особенностей процесса термомеханического калибрования, с использованием жесткого приспособления, напряжения деформации в любом из возможных случаев нагрева приводят к одинаковой величине напряжений в изделии, около 150 МПа. Сочетая умеренную скорость нагрева и высокую начальную температуру печи одновременно при сокращении времени самого процесса нагрева исключается опасность предельных напряжений в изделии.

Отличие основных параметров деформации между конической и цилиндрической обечайками составляет 5-6%, что обусловлено углом наклона плоскостей конической поверхности.

Полученные характерные параметры термомеханического калибрования используются для модификации и уточнения технологии термомеханического калибрования в процессе опытно-конструкторской обработки головного аэродинамического обтекателя РН «Циклон-4» и в проектировании технологических процессов ТМО для крупногабаритных тонкостенных обечаек в изделиях РН "Зенит", "Taurus-2" на ГП ПО "Южмаш" им. А.М. Макарова.

Литература

1. Берштейн, М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов [Текст] / М.Л. Берштейн. – М.: Металлургия, 1968. – 486 с.
2. Яковлев, С.С. Технологические рекомендации по выбору режимов операций деформирования с нагревом [Электронный ресурс] / С.С. Яковлев. – Режим доступа: <http://tula-mpf.narod.ru/win/top/albom/9.htm>. – 02.12.2012.
3. Полухин, Д.С. Изотермическое обратное выдавливание толстостенных трубных заготовок в режиме кратковременной ползучести [Текст] / автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Полухин Дмитрий Сергеевич; Тул. гос. ун-т. – Тула, 2010. – 27 с.
4. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести: монография [Текст] / А.В. Черняев [и др.]; под ред. С.С. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 412 с.
5. Гуляев, А.П. Металловедение [Текст] / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1965. – 293 с.
6. Белов, А.Ф. Металловедение алюминия и его сплавов [Текст]: справ. / А.Ф. Белов, В.И. Добаткин, Н.Н. Буйнов. – М.: Металлургия, 1983. – 389 с.
7. Бреславский, Д.В. Характеристика материала АМгб [Электронный ресурс] / Д.В. Бреславский. – Режим доступа: http://www.splav.kharkov.com/mat_start.php?name_id=1422. – 1.06.2012.
8. Mechanical properties of gray cast iron [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stainless-steel-tube.org/Mechanical-Properties-of-Gray-Cast-Iron.htm>. – 1.06.2012.
9. Справочник по чугуному литью [Текст] / под ред. д-ра техн. наук Н.Г. Гириновича. – 3-е изд. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
10. Расчетно-аналитическая оценка схем термокалибровки и отжига цилиндрических и конических обечаек головного обтекателя РН «Циклон-4» [Текст]: технический отчет / УкрНИИТМ; рук. П.Н. Желтов, исполн. А.А. Фокин. – Днепропетровск, 2007. – 37 с.

11. Крупицкий, В.А. Основы термической обработки [Текст] / В.А. Крупицкий. – М.: Металлургия, 1959. – 121 с.

12. Ковка и штамповка цветных металлов. [Текст]: справ. / под ред. Н.И. Корнева. – М.: Машиностроение, 1971. – 232 с.

13. Ковка и штамповка. [Текст]: справочник в 4-х томах. / под ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1984. – 568 с.

14. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. [Текст] / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.

15. Каплун, А.Е. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство [Текст] / А.Е. Каплун, Е.А. Морозов. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

16. Басов, К.А. ANSYS: справочник пользователя [Текст] / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

17. Залишкові напруги у процесі виготовлення циліндричних та конічних обичайках головного обтічника ракети-носія [Текст] / Д.Г. Шерстюк, О.В. Кулик, Є.А. Джур, Є.А. Сошніков // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: збірних наукових праць, ДНУ ім. О. Гончара. – Том XIV. – Д.: "Пороги". – С. 116-129.

18. Маршрутно-технологический паспорт [Текст]: Корпус 94.7300.1220.0340.00.0, цех №87, сверен и откорректирован с эталоном 25.09.12. – Днепропетровск: ПО ГП "Южмаш" им. А.М. Макарова. – 15 с.

19. Маршрутно-технологический паспорт [Текст]: Корпус 94.7300.1220.0240.00.0, цех №87, сверен и откорректирован с эталоном 07.12.12. – Днепропетровск: ПО ГП "Южмаш" им. А.М. Макарова. – 25 с.

Поступила в редакцию 01.06.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. кафедры технологии производства Е.А. Джур, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск.

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНІЧНОМУ КАЛІБРУВАННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ І КОНІЧНИХ ОБИЧАЙОК ГОЛОВНОГО ОБТІЧНИКА РН «ЦИКЛОН-4»

Д.Г. Шерстюк, О.В. Кулик, О.М. Май

У статті розглянуто моделювання процесу нагрівання в технології термомеханічного калібрування обичайок виробу 2Ц41ГБ, тонкостінних великогабаритних конструкцій головного аеродинамічного обтічника ракети-носія «Циклон-4». З використанням досвіду застосування технології термомеханічного калібрування для обичайок баків ракет-носіїв і результатів моделювання, визначено основні параметри математичного моделювання процесу термомеханічного калібрування. Побудовано характерні закономірності процесу нагріву і сформульовано рекомендації оптимального поєднання ключових параметрів технології. Визначено оптимальні режими термомеханічного калібрування, що забезпечують необхідні механічні характеристики матеріалу виробу і точність його геометрії.

Ключові слова: термомеханічне калібрування, режими нагрівання, математичне моделювання, чисельні методи рішення, ANSYS.

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS IN THE THERMOMECHANICAL CALIBRATION OF CYLINDRICAL AND CONICAL SHELLS OF FAIRING «CYCLONE-4»

D.G. Sherstyuk, A.B. Kulik, A.M. Maiy

The paper considers the modeling of the heat in the thermomechanical calibration technology products 2TS41GB shells, thin-walled structures of large cerebral aerodynamic fairing of the launch vehicle "Cyclone-4". Using the experience of the application of technology for thermo-mechanical calibration of tanks shells launchers and simulation results, the main parameters of the mathematical modeling of thermo-mechanical calibration. Built characteristic patterns of the heating process and makes recommendations optimum combination of key parameters of technology. The optimal thermo-mechanical calibration modes that provide the necessary mechanical properties of the material accuracy of the product and its geometry.

Keywords: thermomechanical calibration, heating modes, mathematical modeling, numerical methods, ANSYS.

Шерстюк Дмитрий Геннадьевич – аспирант каф. технологии производства, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: SherDG@i.ua.

Кулик Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доцент каф. технологии производства, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск, Украина.

Май Александр Михайлович – начальник технологического сектора, ГП ПО "Южмаш" им. А.М. Макарова, Днепропетровск, Украина