

УДК 621.78

Д.Г. Шерстюк<sup>1</sup>,  
 А.В. Кулик<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 А.М. Май<sup>2</sup>, Е.А. Сошников<sup>3</sup>

1 – Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: SherDG@i.ua  
 2 – ПО ГП „Южмаш“ им. А.М. Макарова, г. Днепропетровск, Украина  
 3 – ОАО „Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения“, г. Днепропетровск, Украина

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО КАЛИБРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЕЧАЙКАХ ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ „ЦИКЛОН-4“

D.G. Sherstiuk<sup>1</sup>,  
 A.V. Kulik<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Tech.),  
 A.M. May<sup>2</sup>, Ye.A. Soshnikov<sup>3</sup>

1 – Oles Honchar Dnepropetrovsk National University, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: SherDG@i.ua  
 2 – State Enterprise “Production Association Yuzhny Machine-Building Plant named after A.M. Makarov”, Dnipropetrovsk, Ukraine  
 3 – Public Joint Stock Company “Ukrainian Research Institute of Manufacturing Engineering”, Dnipropetrovsk, Ukraine

## EFFECTIVENESS OF THERMOMECHANICAL CALIBRATION AND DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN THE SHELL NOSE CONE OF CYCLONE-4

**Цель.** Сравнительная характеристика результатов математического моделирования с экспериментальными данными и математическая обработка результатов проведенного термомеханического калибрования.

Сложность конструкции обечаек головного обтекателя ракеты-носителя (РН) „Циклон-4“, высокая стоимость, значительные габаритные размеры изделий (диаметр 3000–4000 мм), а также характерные физико-механические особенности используемых материалов создают необходимость точной оценки эффективности используемых технологий в процессе производства.

**Методика.** В работе проведено сравнение экспериментальных и расчетных параметров процесса термомеханического калибрования обечаек – тонкостенных крупногабаритных конструкций головного обтекателя (РН) „Циклон-4“, и степень его эффективности в зависимости от предшествующих технологических воздействий на изделие.

Эффективным способом борьбы с деформациями в случаях, если изделие сварено из высокопрочного материала, может стать отжиг конструкции в зажимном приспособлении (термомеханическое калибрование).

**Результаты.** Математическая обработка результатов проведенного термомеханического калибрования показала достаточное совпадение экспериментальных и расчетных величин. Анализ экспериментальных данных показал адекватность показаний тензодатчиков в процессе термомеханического калибрования.

Определив достоверность математической модели на основе эксперимента, можно сделать вывод, что высокая эффективность методики исправления эллиптичности и непрямолинейности формы крупногабаритных обечаек напрямую зависит от величины и характера распределения остаточных напряжений, полученных в процессе предшествующих этапов производства.

Аналитические расчеты и численное моделирование процесса термомеханического калибрования позволяют сделать вывод об очевидной необходимости проведения дополнительной операции отжига для снятия остаточных напряжений.

**Научная новизна.** Было установлено, что учет всех технологических воздействий в процессе производства увеличивает эффективность термомеханического калибрования и повышает итоговую точность изделий.

**Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для модификаций существующих технологических процессов термомеханической обработки крупногабаритных тонкостенных конструкций, таких как обечайки головного обтекателя РН „Циклон-4“, повышая их общую эффективность.

**Ключевые слова:** термомеханическое калибрование, математическое моделирование, остаточные напряжения, ANSYS, оценка эффективности

**Постановка проблемы.** Анализ степени влияния технологических воздействий на итоговые показатели

точности обечаек головного обтекателя РН „Циклон-4“ после проведения термомеханического калибрования.

**Анализ основных исследований и публикаций.** Эффективным способом борьбы с деформациями в

случаях, если изделие сварено из высокопрочного материала, может стать отжиг конструкции в зажимном приспособлении (термомеханическое калибрование). Приспособление изготавливается очень жестким, а сварная конструкция зажимается таким образом, чтобы за счет упругого деформирования ликвидировалась остаточная деформация или появилась деформация обратного знака, например обратный выгиб. В результате, когда конструкция вместе с зажимным приспособлением, обладающим большей жесткостью, чем конструкция, нагревается в печи, упругая деформация переходит в пластическую, и после отпуска проектная форма восстанавливается. Попытки исправить конструкции из высокопрочных материалов вручную или под прессом часто приводят к их разрушению [1].

Для осесимметричных крупногабаритных обечаек с внутренними элементами конструкции наиболее эффективной является термомеханическая калибровка по внешней поверхности в жестком приспособлении при повышенных температурах, когда прочность металла падает, а пластические характеристики повышаются, при этом металл становится податливым и легко деформируется [2].

Отпуск целесообразен, когда изготовление сварной конструкции связано с повышенными требованиями к точности, стабильности формы и геометрических размеров при эксплуатационных нагрузках, а также в тех случаях, когда необходимо повысить сопротивляемость хрупким разрушениям при низких температурах. Бывают случаи, когда отпуск нецелесообразен. Прежде всего, это относится к конструкциям, изготовленным из разнородных материалов, когда в результате отпуска снижения остаточных напряжений не происходит. Неэффективен отпуск и в тех случаях, когда жесткость частей конструкции сильно отличается [3].

Аналитические расчеты и численное моделирование процесса термомеханической калибровки позволяют сделать вывод об очевидной необходимости проведения дополнительной операции отжига для снятия остаточных напряжений. Время выдержки при отжиге, который может быть составной частью операции термомеханического калибрования, описывается классической зависимостью для подобных операций. После быстрого снижения в начале операции отжига остаточные напряжения остаются неизменными на минимально возможном уровне независимо от увеличения времени операции [4].

В работе [5] разработана методика прогнозирования деформаций при сварке крупногабаритных конструкций на основе комбинированного применения методов термопластичности и функции усадки, а также разработки соответствующих расчетных алгоритмов реализации комбинированного подхода. Экспериментальная апробация при тепловой правке обших деформаций искривления оси длинной цилиндрической обечайки и длинных шнековых валов показала высокую эффективность разработанной методики.

Сложность конструкции обечаек головного обтекателя РН „Диклон-4“, высокая стоимость, значительные габаритные размеры изделий (диаметр 3000–4000 мм), а также характерные физико-механические особенности используемых материалов создают необходимость точной оценки эффективности используемых технологий в процессе производства.

**Цель исследования.** Сравнительная характеристика результатов математического моделирования с экспериментальными данными и математическая обработка результатов проведенного термомеханического калибрования.

**Изложение основного материала.** Применение термомеханического калибрования, для обеспечения максимальной эффективности и требуемой точности крупногабаритных изделий, требует комплексного учета всех технологических воздействий в процессе производства. Так увеличение нежелательных остаточных напряжений, приводящее к отклонению геометрических форм изделия, происходит при постепенном их накоплении и взаимном усилении в течение предшествующих технологических операций. Такими операциями при производстве обечаек головного обтекателя изделия РН „Диклон-4“ являются фрезерование вафельного фона и приварка торцевых шпангоутов. Эти две операции приводят к появлению эллиптичности обечаек, помимо той, которая выправляется при термомеханическом калибровании после приварки балок функционального стыка.

Непрямолинейность образующей, эллиптичность горизонтального сечения и локальные искажения „вафельного“ фона (рис. 1) являются следствием нескольких взаимосвязанных факторов: остаточных напряжений, накопленных в изделии от предшествующей обработки; формы и расположения зон эллиптичности; параметров термомеханической обработки (температуры и длительности выдержки).

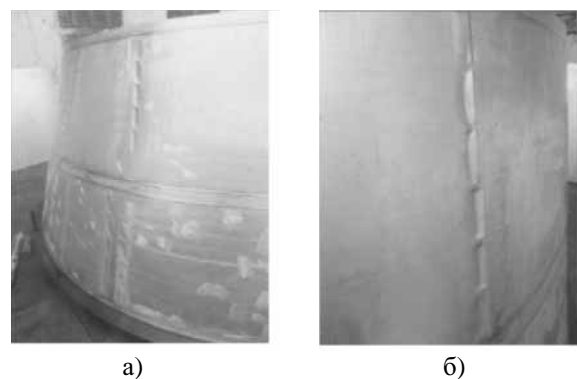


Рис. 1. Деформация обечаек (а, б) в местах максимальной эллиптичности (32 мм) после проведения отжига

Для определения степени влияния того или иного фактора на конечную точность обечаек необходим анализ всех воздействующих элементов в процессе производства, среди которых одним из наиболее

важных является термомеханическая калибровка обечаек после приварки балок функционального стыка с последующим отжигом для уменьшения и перераспределения критических зон остаточных напряжений.

Кривая изменения температуры в процессе термической обработки изображена на рис. 2 [6].

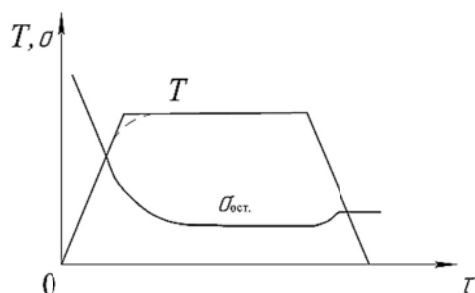


Рис. 2. Влияние температуры ( $T$ ) и длительности отпуска ( $\tau$ ) на изменение остаточных напряжений ( $\sigma_{ост}$ )

В начальный момент идёт быстрое повышение температуры, затем следует стадия выдержки и последний этап – охлаждение. Пунктирной линией на температурной кривой изображена стадия выравнивания температуры по толщине металла. На температурный график наложена кривая снижения

остаточных напряжений. Как видно на рис. 2, на стадии нагрева остаточные напряжения в конструкции снижаются очень быстро, на стадии выдержки при постоянной температуре это снижение резко замедляется и, наконец, на стадии охлаждения происходит некоторое возрастание остаточных напряжений.

В табл. 1–2 приведены, по соответствующим сечениям (рис. 3), геометрические отклонения верхней и нижней поверхностей конических обечаек корпуса Конус № 1 и Конус № 3 после сварки полуобечаек и после проведения термомеханического калибрования [7–8].

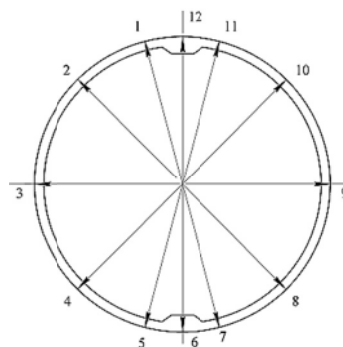


Рис. 3. Расположение контрольных сечений по обечайке корпуса Конус №3 до и после проведение термомеханического калибрования

Таблица 1

Геометрические параметры обечаек Конус №1 и Конус №3 до и после проведения термомеханического калибрования

Сечение	Конус №1				Конус №3			
	После сварки		После ТМК		После сварки		После ТМК	
	$\varnothing_{\text{макс.}}$ , мм	$\varnothing_{\text{мин.}}$ , мм	$\varnothing_{\text{макс.}}$ , мм	$\varnothing_{\text{мин.}}$ , мм	$\varnothing_{\text{макс.}}$ , мм	$\varnothing_{\text{мин.}}$ , мм	$\varnothing_{\text{макс.}}$ , мм	$\varnothing_{\text{мин.}}$ , мм
1–7	4080	3505	4060	3510	3200	2310	3190	2310
2–8	4070	3525	4060	3515	3180	2320	3185	2310
3–9	4085	3535	4080	3520	3180	2310	3185	2310
4–10	4070	3525	4060	3515	3170	2315	3185	2310
5–11	4070	3505	4060	3510	3195	2305	3180	2305
6–12	4070	3500	4050	3510	3190	2305	3190	2305

Таблица 2

Показатели контрольных параметров точности для обечаек Конус № 1 и Конус № 3 после проведения термомеханического калибрования

Изделие / Контрольные параметры	Измерение эллиптичности		Не прямолинейность образующей (по сечениям)			
	$\Delta\varnothing_{\text{макс.}}$	$\Delta\varnothing_{\text{мин.}}$	$\Delta l_1$	$\Delta l_7$	$\Delta l_5$	$\Delta l_{11}$
Конус №1	10	5	0,7	0,6	0,6	0,8
Конус №3	2,5	2,5	2,5	1,5	2	2

Для проведения анализа и формирования выводов о влиянии одного или нескольких факторов процесса термообработки обечаек на конечную точность изделия создана математическая модель.

Моделирование проводилось для корпусов Конус № 1–3 при двух различных режимах отжига.

Динамика изменения остаточных напряжений, в зависимости от условий нагрева, показана в табл. 3–4 и на рис. 2.

Режим № 1 предполагает выдержку без силового взаимодействия при температуре образования технологического зазора между обечайкой и оправкой во время остывания. В процессе предварительного моделирования установлено, что температурой образования технологического зазора является 260–270°C.

Режим № 2 является более интенсивной операцией отжига за счет повторного силового взаимодействия между обечайкой и оправкой (повторно нагревая изделие до температуры термической калибровки и выдержки в течение 60 минут после выдержки при температуре 270°C).

Режим № 1:

1. Температура загрузки 100°C, скорость нагрева – 125 °C/час.
2. Нагрев до 320±10 °C, выдержка 2 часа.
3. Охлаждение в печи до 270°C, выдержка 1 час.
4. Охлаждение до цеховой температуры вне печи на воздухе.

Таблица 3

Напряженно-деформированное состояние и остаточные напряжения обечаек с различной величиной эллиптичности в момент нагрева до температуры 320±10°C ( $\sigma_e$ ) и после охлаждения до цеховой температуры ( $\sigma_e^{ост.}$ )

$\Delta$ , мм	Обечайки					
	Конус №1		Конус №2		Конус №3	
	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma_e^{ост.}$ , МПа	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma_e^{ост.}$ , МПа	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma_e^{ост.}$ , МПа
0	5,4–968	0,51–4,46	4,3–1326	0,54–4,55	1,5–882	0,5–4,4
5	3,3–976	0,53–4,6	4,2–1128	0,54–4,58	1,5–758	0,52–4,52
10	8,4–986	0,54–4,62	5,8–1272 (3325*)	0,54–4,83	1,5–1323	0,52–4,59
20	5–1716 (3115*)	0,56–4,66	5,8–1273 (3328*)	0,56–4,97	5,3–763 (1896*)	0,56–4,78
$\Delta$ макс.	4,2–1314 (2299*) ( $\Delta=32$ мм)	0,53–4,59	1,3–817 (2438*) ( $\Delta=32$ мм)	0,57–4,98	5,2–1077 (2096*) ( $\Delta=24$ мм)	0,65–5,8

Условные обозначения:  $\Delta$  – величина эллиптичности, мм;  $\sigma_e$  – эквивалентное напряжение, МПа;  $\sigma_e^{ост.}$  – эквивалентное остаточное напряжение; \* – значение указывает на очаги напряжения;  $\Delta$  макс – максимальная величина эллиптичности, при которой полностью перекрывается технологический зазор.

Режим № 2:

1. Температура загрузки 100 °C, скорость нагрева – 125°C/час.

2. Нагрев до 320±10 °C, выдержка 2 часа.
3. Охлаждение в печи до 270°C, выдержка 1 час.
4. Повторный нагрев от 270°C до 320±10°C со скоростью 125°C/час.
5. Выдержка 1 час.
6. Охлаждение до цеховой температуры вне печи на воздухе.

В табл. 2 приведены результаты моделирования в соответствии с параметрами режима № 2.

Таблица 4

Напряженно-деформированное состояние и остаточные напряжения обечаек с различной величиной эллиптичности в момент нагрева до температуры 320±10°C ( $\sigma_e$ ) и после охлаждения до цеховой температуры ( $\sigma_e^{ост.}$ )

$\Delta$ , мм	Обечайки					
	Конус №1		Конус №2		Конус №3	
	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma_e^{ост.}$ , МПа	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma_e^{ост.}$ , МПа	$\sigma_e$ , МПа	$\sigma_e^{ост.}$ , МПа
0	5,4–968	0,52–4,6	4,3–1326	0,56–4,97	1,5–882	0,51–4,59
5	3,3–976	0,55–4,8	4,2–1128	0,57–4,99	1,5–758	0,53–4,7
10	8,4–986	0,58–5,1	5,8–1272 (3325*)	0,57–5,01	1,5–1323	0,54–4,71
20	5–1716 (3115*)	0,59–5,2	5,8–1273 (3328*)	0,58–5,1	5,3–763 (1896*)	0,7–5,9
$\Delta$ макс.	4,2–1314 (2299*) ( $\Delta=32$ мм)	0,62–5,3	1,3–817 (2438*) ( $\Delta=32$ мм)	0,58–5,05	5,2–1077 (2096*) ( $\Delta=24$ мм)	0,68–8

Условные обозначения:  $\Delta$  – величина эллиптичности, мм;  $\sigma_e$  – эквивалентное напряжение, МПа;  $\sigma_{e\text{ост}}$  – эквивалентное остаточное напряжение; \* – очаги напряжения;  $\Delta_{\text{max}}$  – максимальная величина эллиптичности, при которой полностью перекрывается технологический зазор.

Полученные результаты моделирования остаточных напряжений, их небольшую величину, разброс в пределах 20% и при разных величинах эллиптичности можно объяснить тем, что определенной температуре отжига в каждом конкретном изделии соответствует свой конечный уровень остаточных напряжений, по достижении которого увеличивать продолжительность отжига практически бесполезно.

От уровня исходных напряжений зависит время их разрядки во время отжига и тем заметнее результат проводимой термической обработки. В случае небольшой начальной величины остаточных напряжений, результат проводимого отжига оказывает положительное воздействие, приводит к снижению на 50% начальных остаточных напряжений, но абсолютная их величина, в пределах 4-8 МПа, остается незначительной (рис. 4).

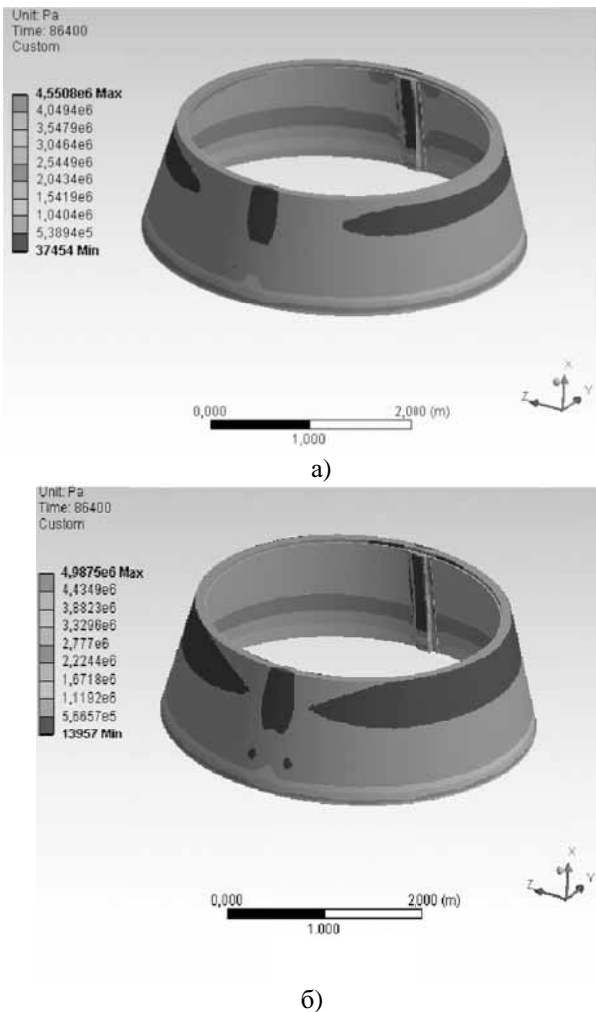


Рис. 4. Остаточные напряжения обечайки Конус № 2 с эллиптичностью 0 мм (а) и 32 мм (б) после охлаждения до цеховой температуры

Для определения величины напряжений деформирования во время операции термомеханического калибрования обечайки корпуса Конус № 3 использовались тензодатчики НМТ-450, установленные в сечениях 10 и 8 (рис. 3).

Данные эксперимента для полноты анализа должны пройти сравнение с результатами расчета, а именно математического моделирования корпуса Конус № 2.

Полученные в результате эксперимента величины абсолютных деформаций приведены табл. 5.

Таблица 5

Динамическое абсолютное изменение величины деформации ( $\epsilon$ , %) по четырем тензодатчикам НМТ-450

Температура, °C	Датчики			
	1	2	3	4
200	3,246	5,651	5,841	3,927
225	3,271	5,823	5,841	3,975
250	3,288	5,710	5,841	3,981
303	3,370	5,790	6,067	4,054
313	3,370	5,835	5,966	4,057
319	3,370	5,790	6,011	4,057
310	3,379	4,630	4,795	3,715
295	2,446	2,838	3,104	2,468
280	0,893	0,794	0,882	0,820
270	1,835	5,043	5,502	2,895

На рис. 5, после математической обработки результатов эксперимента по термообработке, показано изменение величины приращения деформации, нормированной по максимальной температуре. Данный рисунок показывает общий для всех датчиков характер поведения, что подтверждает их исправность, а плавная полиномиальная линия тренда подтверждает общую достоверность результатов, полученных в ходе эксперимента.



Рис. 5. Нормированное изменение приращения деформации, нормированной по максимальной температуре

Отрицательные значения на графике при температуре 310°C указывают на процесс деформирования обечайки, её полное прилегание к внутренней по-

верхности оправки и исправление зон эллиптичности и непрямолинейности образующей.

При температурах 260–280°C образуется технологический зазор – постепенный отход обечайки от внутренней поверхности оправки.

Характерное увеличение показаний датчиков при температуре 280°C свидетельствует о действии деформирующего усилия во время остывания, которое уравнивает напряжения внутри изделия в процессе остывания.

Анализ экспериментальных данных показал адекватность показаний тензодатчиков в процессе термообработки корпуса Конус №2, тем самым подтверждая достоверность данных моделирования и эффективность процесса термомеханического калибрования, которая, тем не менее, зависит от величины остаточных напряжений и качества проведения предшествующих технологических операций.

**Выводы.** Сложность процесса исправления различных видов и величины эллиптичности, зависящей от множества взаимосвязанных факторов, для корректной интерпретации требует применения различных методик и разного количества используемых датчиков во время проведения замеров.

Математическая обработка результатов проведенного термомеханического калибрования показала достаточное совпадение экспериментальных и расчетных величин.

В результате проведенного моделирования, на примере изделия Конус №3, получены уточненные параметры процесса термомеханического калибрования обечаек, и оценена достоверность расчетных величин в сравнении с экспериментальными данными.

Данные моделирования и результаты эксперимента – сопоставимы и отражают общий характер процесса.

Определив достоверность математической модели на основе эксперимента, можно сделать вывод, что высокая эффективность методики исправления эллиптичности и непрямолинейности формы крупногабаритных обечаек напрямую зависит от величины и характера распределения остаточных напряжений, полученных в процессе предшествующих этапов производства.

Было установлено, что учет всех технологических воздействий в процессе производства увеличивает эффективность термомеханического калибрования и повышает итоговую точность изделий.

Полученные результаты могут быть использованы для модификаций существующих технологических процессов термомеханической обработки крупногабаритных тонкостенных конструкций, таких как обечайки головного обтекателя РН „Циклон-4“, повышая их общую эффективность.

#### Список литературы / References

1. Сварка. Введение в специальность / В.А. Фролов, В.В. Пешков, А.Б. Коломенский, В.А. Казаков. – М., 2004. – 234 с.

Frolov, V.A., Peshkov, V.V., Kolomenskiy, A.B. and Kazakov, V.A. (2004), *Svarka. Vvedeniye v spetsyalnost* [Welding. Specialty Introductory Course], Moscow, Russia.

2. Шерстюк Д.Г. Порівняльна характеристика методів забезпечення точності геометричних параметрів віссиметричних великогабаритних конструкцій / Д.Г. Шерстюк, О.В. Кулик, А.А. Фокін // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: ракетно-космічна техніка. – 2012. – Випуск 15. – Том 2. – С. 207–213.

Sherstiuk, D.G., Kulik, A.V. and Fokin, A.A. (2012), “Comparison of methods to ensure the accuracy of axisymmetrical geometrical parameters of large structures”, *Bulletin of Dnipropetrovsk University, Series: rocket-space technique*, Issue 15, Volume 2, DNU, pp. 207–213.

3. Головин Г.Ф. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Головин Г.Ф., Зимин Н.В. – Л.: Машиностроение, 1998. – 87 с.

Golovin, G.F. and Zimin, N.V. (1998), *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki metallov s primeneniym induktsyonnoy nagreva* [Technology of Heat Treatment of Metals with Induction Heating], Mechanical Engineering, St. Petersburg, Russia.

4. Залишкові напруги у процесі виготовлення циліндричних та конічних обечаек головного обтічника ракети-носія / Д.Г. Шерстюк, О.В. Кулик, С.А. Джур [та ін.] // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: збірник наукових праць, ДНУ ім. О.Гончара. – 2012. – Том XIV. – С. 116–129.

Sherstiuk, D.G., Kulik, O.V., Dzhur, Ye.A., Soshnikov, Ye.A. (2012), “Zalyshkovi napruhy v protsesi vyhotovlennia tsylindrychnykh ta konichnykh obychaiok holovnoho obtichnyka rakety-nosiiia” [Residual stresses in the shell nose cone of rocket vehicle production process], *System design and performance analysis of aerospace technology: modular scientific papers of O. Gonchar DNU*, Volume XIV, pp. 116–129.

5. Махненко О.В. Прогнозирование деформаций при сварке и тепловой правке конструкций на основе методов термопластичности и функции усадки: автореф. диссертация на соискание научной степени доктора технических наук: специальность 05.03.06 „Сварка и родственные технологии“ / О.В. Махненко – К., 2009. – 18 с.

Makhnenko, O.V. (2009), “Prediction of deformation during welding and thermal straightening designs based on the thermoplastic methods and features of shrinkage”, Abstract of doctor of technical science dissertation, specialty 05.03.06 “Welding and Related Technologies”, Institute of Electric, Paton National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine.

5. Двуреченский А.Г. Опыт термокалибровки сварных оболочковых конструкций для уменьшения сварочных деформаций и напряжений / А.Г. Двуреченский, В.П. Корнеев, В.А. Казаков // Технология машиностроения. – 2009. – № 12. – С. 37–44.

Dvurechensky, A.G., Korneev, V.P. and Kazakov, V.A. (2009), “Experience of thermal calibration of welded shell structures to reduce the welding deformation and stress”, *Manufacturing Engineering*, no. 12, pp. 37–44.

6. Маршрутно-технологический паспорт: Корпус 94.7300.1220.0340.00.0, цех №87, сверен и откоррек-

тирован с эталоном 25.09.12 – Днепропетровск: ПО ГП „Южмаш“ им. А.М. Макарова. – 2012. – 15 с.

Manufacture-tracking sheet: Site 94.7300.1220.0340.00.0, workshop No.87, verified and corrected with the standard 25.09.12, Dnepropetrovsk, “Uzmash”, 15 p.

7. Маршрутно-технологический паспорт: 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. – 2012. – 25 с.

Manufacture-tracking sheet [Text]: Site 94.7300.1220.0240.00.0, workshop No.87, verified and corrected with the standard 07.12.12 - Dnepropetrovsk, “Uzmash”, 25 p.

**Мета.** Порівняльна характеристика результатів математичного моделювання з експериментальними даними й математична обробка результатів проведеного термомеханічного калібрування.

Складність конструкції обичайок головного обтічника ракети-носія (РН) „Циклон-4“, висока вартість, значні габаритні розміри виробів (діаметр 3000–4000 мм), а також характерні фізико-механічні особливості використовуваних матеріалів створюють необхідність точної оцінки ефективності використовуваних технологій у процесі виробництва.

**Методика.** У роботі проведено порівняння експериментальних і розрахункових параметрів процесу термомеханічного калібрування обичайок – тонкостінних великогабаритних конструкцій головного обтічника РН „Циклон-4“, і ступінь його ефективності в залежності від попередніх технологічних операцій.

Ефективним способом боротьби з деформаціями у випадках, коли виріб зварено із високоміцного матеріалу, може стати відпал конструкції в затискному пристосуванні (термомеханічне калібрування).

**Результати.** Математична обробка результатів проведеного термомеханічного калібрування показала достатню відповідність експериментальних і розрахункових величин. Аналіз експериментальних даних показав адекватність показань тензодатчиків у процесі термомеханічного калібрування.

Визначивши достовірність математичної моделі на основі експерименту, можна зробити висновок, що висока ефективність методики виправлення еліптичності та непрямолінійності форми великогабаритних обичайок безпосередньо залежить від величини й характеру розподілу залишкових напруг, отриманих у процесі попередніх етапів виробництва.

Аналітичні розрахунки та чисельне моделювання процесу термомеханічного калібрування дозволяють зробити висновок щодо очевидної необхідності проведення додаткової операції відпалу для зняття залишкових напруг.

**Наукова новизна.** Було встановлено, що облік усіх технологічних впливів у процесі виробництва збільшує ефективність термомеханічного калібрування та підвищує результуючу точність виробів.

**Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані для модифікації існуючих

технологічних процесів термомеханічної обробки великогабаритних тонкостінних конструкцій, таких як обичайки головного обтічника РН „Циклон-4“, підвищуючи їх загальну ефективність.

**Ключові слова:** *термомеханічне калібрування, математичне моделювання, залишкові напруги, ANSYS, оцінка ефективності*

**Purpose.** Comparative characteristics of the results of mathematical modeling with experimental data and mathematical treatment of the results of the thermo-mechanical calibration.

The complexity of the design of the fairing shells RN “Cyclone-4”, high cost, large dimensions of articles (diameter of 3000–4000 mm), and typical physico-mechanical characteristics of the materials used require to provide an accurate assessment of the effectiveness of the technologies used in the production process.

**Methodology.** The paper compares the experimental and calculated parameters of the process of thermomechanical calibration of shells, the large thin-walled structures fairing RN “Cyclone-4”, and assesses its degree of effectiveness depending on the previous technological influences on the product.

The annealing in the fixing device (thermo-mechanical calibration) can be an effective way to deal with the strains in cases where the product is brewed from high-strength material.

**Findings.** Mathematical treatment of the results of the thermo-mechanical calibration showed sufficient agreement between the experimental and calculated values. The analysis of the experimental data showed the adequacy of the evidence in the process of thermo-mechanical strain gauge calibration.

Determination of the validity of the mathematical model based on an experiment allows us to conclude that the high efficiency method of correction of ellipticity and straightness of oversized shells form depends on the magnitude and distribution of residual stresses produced during the previous production stages.

Analytical calculations and numerical modeling of thermo-mechanical calibration make it clear that the additional annealing treatment is required to relieve residual stresses.

**Originality.** We have found out that taking into account of all the technological effects during production process improves the efficiency of the thermomechanical calibration and increases the accuracy of the final product.

**Practical value.** The results can be used for modification of the existing technology of thermomechanical processing of large thin-walled structures, such as shell fairing, RN “Cyclone-4”, and increasing their overall efficiency.

**Keywords:** *thermo-mechanical calibration, mathematical modeling, residual stresses, ANSYS, performance evaluation*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Р.П. Дідиком. Дата надходження рукопису 16.05.13.*