

А.Д. Пирогов, главный инженер производства атомных энергетических насосов и комплектующего оборудования ПАО «СМНПО им.М.В.Фрунзе», г. Сумы, Украина

## Применение имитационных моделей при расчетах тепловых напрессовок ответственных соединений

Рассмотрены вопросы определения основных технологических режимов для сборки с термовоздействием прессовых соединений крупных узлов на базе решения задач математического моделирования кинетики напряженного и теплового состояния. Приведены практические примеры использования этих разработок.

**Ключевые слова:** прессовое соединение, длинномерные детали, сборка с термовоздействием, конечные элементы, натяг, зазор, осевое усилие, распределение температур, принудительное охлаждение.

Розглянуті питання визначення основних технологічних режимів збирання пресових з'єднань з термодією на базі вирішення задач математичного моделювання кінетики напруженого і теплового стану. Надані практичні приклади використання цих розробок.

**Ключові слова:** пресове з'єднання, довгомірні деталі, збирання з термодією, кінцеві елементи, натяг, зазор, осьове зусилля, розподілення температур, примусове охолодження.

The determination of main process conditions for assembling with thermal action of compression connections of the major assembly units based on the solution of mathematic simulation of kinetics of stress and thermal state has been considered. The practical examples of the usage of these developments have been given.

**Keywords:** compression connection, long parts, assembling with thermal action, finite elements, interference, clearance, axial force, temperature distribution, forced cooling.

Для передачи значительных крутящих моментов и осевых усилий во многих крупногабаритных узлах ответственных машин часто применяются соединения с натягом. Простота конструкции обеспечивает надежность соединения при правильном выборе параметров и недопущении перегрузок, вызывающих смещение собранных деталей. Здесь важное место отводится способу сборки соединения. При длине деталей значительно большей диаметра посадки целесообразно использовать способ сборки с термовоздействием (СТВ), значительно повышающий прочностные характеристики соединений с натягом. В соответствующей литературе достаточно полно освещены теоритические основы тепловой напрессовки деталей для передачи крутящих моментов (в т.ч. со шпонками) [1,2], меньше по многоэлементной сборке нескольких деталей, например: рабочих колес и промежуточных втулок центробежных компрессоров [3] с обеспечением тепловых зазоров 0,003-0,05 мм в роторах

(рис. 1.) или их отсутствия для секционных насосов (рис. 2); при СТВ втулок опорного подшипника крупного насоса ГЦН-195М (рис. 3); колес вакуумных водокольцевых насосов типа ВВН (рис. 4) с отношением длины к диаметру  $l/d > 5$ ; зубчатых колес, полумуфт (рис. 5) компрессоров технологического газа КТГ – 317 (рис. 6) и пр. на валы



Рис. 1. Многоступенчатый ротор центробежного турбокомпрессора ГПА



Рис. 2. Тепловая напрессовка рабочих колес при сборке съемной части многоступенчатого подпиточного насоса АЦНА 25-185

роторов. СТВ также применяется для напрессовки сердечников роторов или переходных втулок в пустотельные валы крупных электрических машин (рис. 7). Нет четких обоснованных рекомендаций и приемле-

мых методов расчета по управлению тепловыми деформациями в осевом направлении для обеспечения безазорной напрессовки по торцам длинномерных деталей, особенно для более сложных комбинированных и полисоединений [4] (рис. 8). На каждом предприятии для подобных случаев в результате дорогостоящих экспериментов и опыта подбираются свои практические технологии.

Решение таких задач в условиях жестких сроков на технологическую подготовку требует применения оперативного математического моделирования кинетики напряженного и теплового состояния соединения.

*Постановка задачи контактного взаимодействия элементов соединения:* определить условия, обеспечивающие управление торцовыми зазорами. По теоритическим методикам требуется выбрать наиболее приемлемые рациональные технологические параметры для выполнения условия  $\Delta_{тор} = 0$ .

Основные из них: форма сопрягаемых деталей, точность схемы сборки, термический сборочный зазор, компенсационное расширение на время передачи в сборочную позицию, усилие прессы, температура нагрева, время выдержки, точное расположение зоны охлаждения, продолжительность охлаждения и пр.

Во время естественного охлаждения охватывающей детали (ОД)



**Рис. 3. Вертикальная сборка ротора главного циркуляционного насоса ГЦН-195М для АЭС**



**Рис. 4. Ротор водокольцевого вакуумного насоса ВВН**



**Рис. 5. Проверка зазоров при вращении рабочих органов типа РУТС перед общей сборкой компрессора технологического газа КГТ-317**



**Рис. 6. 2-х роторный компрессор технологического газа (масса 30т)**

происходит неконтролируемое увеличение зазора вследствие температурного сокращения длины. Для устранения данного явления предложен ряд технологических приемов, заключающийся в управлении процессом охлаждения и дополнительным силовым воздействием в осевом направлении.

Математическое моделирование процесса СТВ заключается в постановке связанных контактных задач нестационарной теплопроводности для двух (или нескольких) осесимметричных тел вращения.

*Порядок работы*

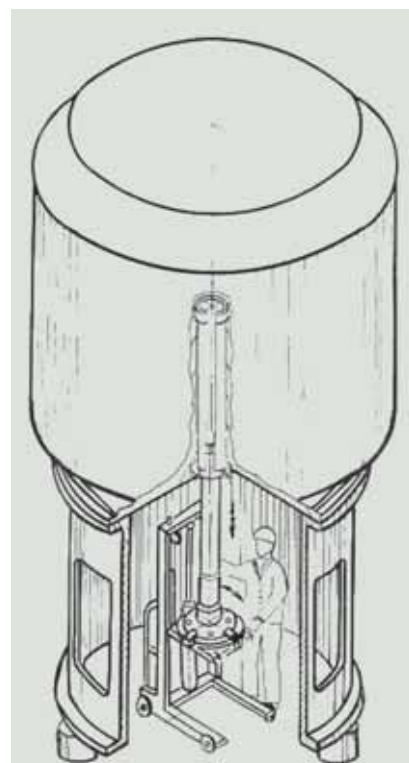
1. Анализ задачи.
2. Решение методом конечных элементов (МКЭ) задачи напряженно-деформированного состояния (НДС) осесимметричных деталей.

3. Решение МКЭ нестационарной температурной контактной задачи для осесимметричных деталей.

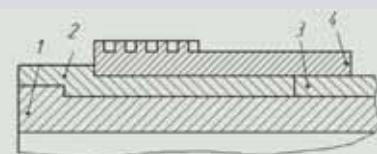
4. Численная апробация расчета СТВ на уже проверенной опытом типовой задаче.

5. После уточнения результатов проводятся численные исследования новой СТВ для выбора технологической оптимизации.

Уравнение нестационарной теплопроводности в цилиндрической системе координат имеет вид:



**Рис. 7. Схема СТВ шлицевой втулки с пустотельным ротором крупного вертикального электродвигателя ВАЗ 215/109 (масса 50 т)**



**Рис. 8. Полисоединение с последовательным бандажированием тяжело нагруженной трубы 1 кожухами 2,3,4**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где  $T(r, z, t)$  – температура, являющаяся функцией координат  $r, z$  и времени  $t$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности.

В уравнении (1) для получения единственного решения задаются начальные условия однозначности  $T(r, z, t)=T_0$ , начальная температура вала определяется температурой окружающей среды, а начальная температура ОД должна быть достаточной для необходимого увеличения ее внутреннего диаметра, не превышая допустимые пределы для данного материала.

Граничные условия свободных поверхностей определяются конвекцией с окружающей средой:

$$K \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_n - T_c), \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент теплопроводности,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $n$  – нормаль к поверхности тела,  $T_n$  и  $T_c$  – температуры поверхности и окружающей среды.

Контактному теплообмену деталей всегда сопутствует контактное термическое сопротивление  $R_a$ , оцениваемое величиной эквивалентной длины материала  $B$ . Температурный перепад соответствует скачку в зоне контакта:

$$Ra = B / K. \quad (3)$$

ОД в процессе охлаждения вступает в контакт с валом, и в обоих телах возникают внутренние напряжения. НДС соединения описывается уравнениями термоупругости. Для осесимметричных задач в цилиндрических координатах (здесь положение каждой точки определяют три координаты:  $r$  – радиус,  $z$  – высота,  $\varphi$  – угол относительно выбранного нулевого меридиана). Система уравнений термоупругости включает:

– уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0, \quad (4)$$

– геометрические зависимости:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial v}{\partial r}; \varepsilon_\varphi = \frac{v}{r}; \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \gamma_{rz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}; \end{aligned} \quad (5)$$

– физические зависимости (закон Гука):

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} \sigma_r - V(\sigma_\varphi + \sigma_z) + \beta(T - T_0) \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{E} [\sigma_\varphi - V(\sigma_r + \sigma_z)] + \beta(T - T_0) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \sigma_z - V(\sigma_r + \sigma_\varphi) + \beta(T - T_0) \\ \gamma_{rz} &= \frac{1}{G} \tau_{rz}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $E_r, E_\varphi, E_z$  – продольные деформации,  $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z$  – нормальные и касательные составляющие напряжений,  $\gamma_{rz}$  – угловые деформации в плоскости,  $\beta$  – коэффициент линейного расширения (сжатия) материала при нагревании (охлаждении).

Выполнение геометрического условия совместности перемещений ОД  $W_\sigma$  и вала  $W_c$  в зоне контакта при равенстве контактных усилий:

$$W_\sigma - W_c = \delta, \quad (7)$$

где  $\delta$  – величина натяга в зоне контакта.

Решение задачи НДС тел вращения проведено с применением МКЭ в форме метода перемещений [5] с использованием цилиндрической системы координат  $r, z, \varphi$  с тороидальными конечными элементами (КЭ) треугольного поперечного сечения и тремя узлами. Компоненты перемещений в узлах КЭ однозначно определяют перемещения внутри элемента:

$$\vec{U}^e = \{u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3\}^T, \quad (8)$$

где  $U_i, V_i$  – перемещения в  $i$ -узле, радиальном  $r$  и осевом  $z$  направлениях соответственно.

Решение задачи МКЭ приводит к системе линейных алгебраических уравнений:

$$[K] \vec{U}^e = \vec{R}_\alpha + \vec{F}_e, \quad (9)$$

где  $[K]$  – матрица жесткости всей детали, состоящая из матриц жесткости конечных элементов

$$[k] = \int_{V^e} [B]^T [D] [B] dV^e, \quad (10)$$

$\vec{R}$  – вектор внешних узловых сил,  $V_e$  – объем КЭ,  $e$  – определяет матрицы элементов,  $\vec{F}_e = \int_{V^e} [B]^T [D] \vec{\varepsilon}^{(0)} dV^e$  – вектор сил, обусловленных температурными деформациями  $\vec{\varepsilon}^{(0)}$ ,  $[D]$  – матрица упругости, содержа-

щая характеристики материала: модуль упругости  $E$  и  $\nu_i$  коэффициент Пуассона:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{0.5-\nu}{1-\nu} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Матрица  $[B]$  связывает перемещения и деформации в КЭ:

$$\vec{\varepsilon} = [B] \vec{U}^e = [[B_1][B_2][B_3]] \vec{U}^e. \quad (12)$$

Учет контактного взаимодействия ведется через специальные контактные КЭ, содержащими два узла с одинаковыми координатами, принадлежащими к смежным контактирующим телам.

В радиальном  $r$  и осевом  $z$  направлениях задаются типы характеристик элемента: отсутствие взаимодействия, натяг, натяг-зазор, проскальзывание (в перпендикулярном направлении). Элемент характеризуется длиной  $\ell$  вдоль линии контакта в плоскости  $rz$  (вся область контакта должна быть «распределена» между контактными элементами) и эквивалентной толщиной  $B$ , которая характеризует его термическое сопротивление  $R_a$ .

Решение нестационарной температурной задачи МКЭ сводится к системе линейных алгебраических уравнений [6]:

$$[C] \frac{\partial \vec{T}}{\partial t} + [K] \vec{T} = \vec{F}, \quad (13)$$

где  $[C]$  – матрица демпфирования тела,  $[K]$  – матрица теплопроводности,  $\vec{F}$  – вектор внешних нагрузок,  $t$  – время,  $\vec{T}$  – вектор температур в узлах.

Вся область теплового контактного взаимодействия разделена на специальные контактные КЭ и эквивалентную площадь  $B$ , характеризующую  $R_a$  (рис. 9). Между деталями происходит взаимодействие через контактные КЭ, действующие при расчете НДС и решении нестационарной температурной задачи. Схема нагружения в момент начала сборки приведена на рис. 10.б, разбиение соединения на КЭ – рис. 10. в.

Порядок расчета

1. Определение НДС при  $t=0$ .
2. Решение нестационарной

температурной задачи продолжительностью 30 сек и шагом по 5 сек при использовании данных о НДС для вычисления параметров контактных элементов.

3. Определение НДС в текущий момент времени с использованием данных о распределении температур в конструкции.

4. При превышении разности на  $150^{\circ}\text{C}$  между максимальной и минимальными температурами – переход к п. 2.

5. Определение НДС конструкции при рабочей температуре цеха ( $T_{\text{раб}}$ ).

*Результаты численности анализа*

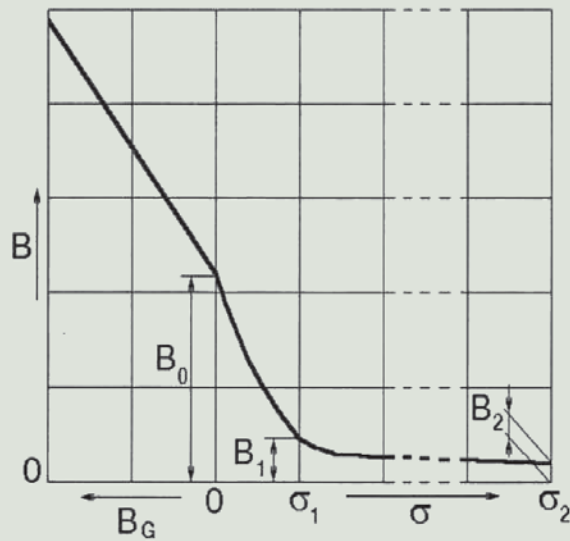
Согласно экспериментальным данным распределения температур на поверхности ОД (рис. 11) за начальный момент времени  $t=0$  для расчетов приняты:  $t_n=160$  сек и  $T_n=370^{\circ}\text{C}$ . Через 60 сек начинается принудительное охлаждение поверхности ОД. Показания изменения температуры: 1, 2, 3, 4 и 5, 6, 7, 8 соответственно верхней и нижней части ОД (9 – показания контрольной термопары).

Пример выполнения расчета тепловой посадки вала на втулку, нагретую до  $T=370^{\circ}\text{C}$ .

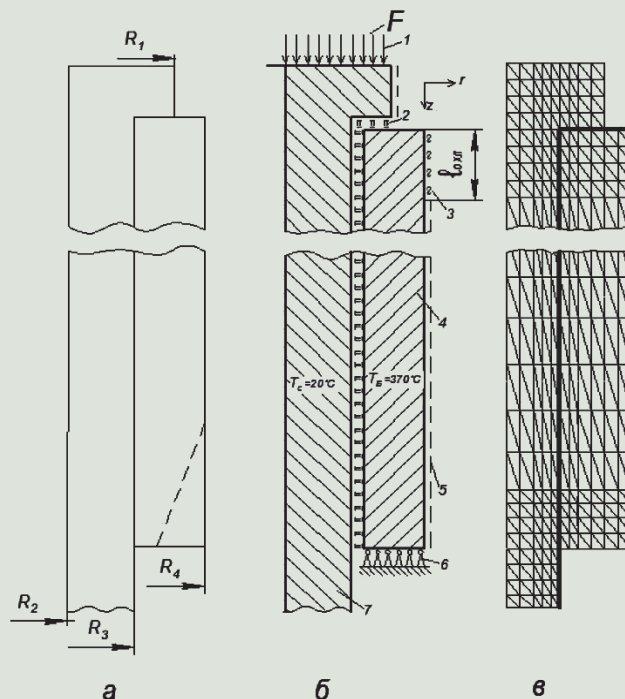
При вертикальной сборке втулка прижимается к бурту вала усилием прессы  $F=2,5$  МН, наибольший натяг в соединении  $\delta_{\text{max}}=0,53$  мм, минимальная ширина бурта вала (АС) – 12,3 мм. На рис. 12. показано распределение осевых напряжений  $\sigma_z$  в поперечном сечении от начала сборки при  $t=120, 240$  сек и в период  $T_{\text{раб}}$ .

В результате выполненной работы установлено:

- схватывание ОД с валом начинается возле упора (охлаждение этой зоны гарантирует стабильность);
- через 120 сек контакт происходит по всей поверхности (зависит от точности формы и центрирования деталей);
- выравнивание температур в радиальном направлении наступает через 240 сек, ОД укорачивается;
- вал удлиняется, а торец АС ОД «отходит» от упора, поэтому необходимо обеспечивать действие прижимающей силы до окончания выравнивания температур;



**Рис. 9. Зависимость эквивалентной толщины  $B$  контактного элемента от состояния СТВ**



**Рис. 10. а) размеры СТВ; б) схема действующих нагрузок в прессовом соединении при  $t=0$  (1-осевое усилие прессы  $F$ , 2 – контактные элементы, 3 – зона водяного охлаждения, 4 – ОД, 5 – зона естественного охлаждения, 6 – граничные условия, 7 – вал с упором); в) разбиение СТВ на КЭ**

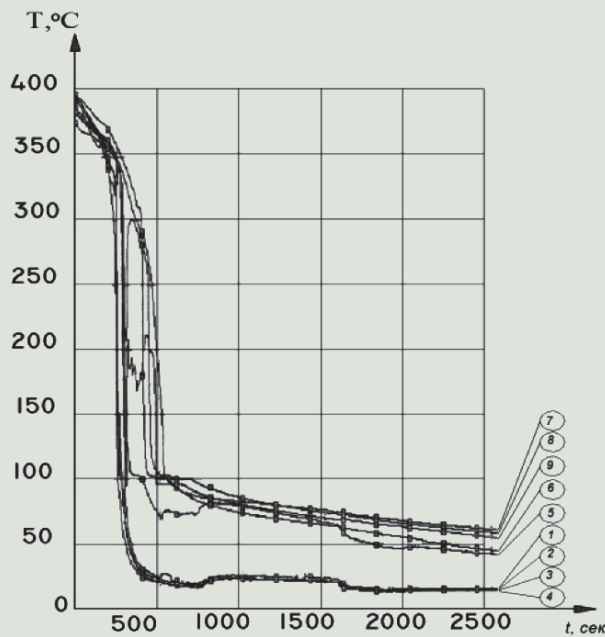


Рис. 11. Экспериментальные данные распределения температур в процессе зоны контакта

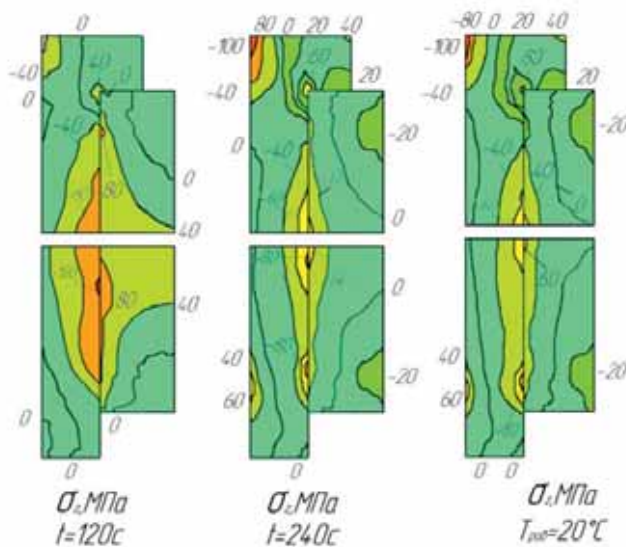


Рис. 12. Распределение осевых напряжений  $\sigma_z$

▪ величина силы взаимодействия пропорциональна коэффициенту трения.

На рис. 13 показана кинетика температур при напрессовке первого кожуха полисоединения (рис. 8).

Исследования подтвердили, что для управления качеством СТВ ответственных соединений недостаточно упрощенных расчетов.

Выявлены некоторые особенности, происходящие во времен-

ных режимах формирования натяга, обнаружить которые без расчетов невозможно. Например, в точке С имеется касание к упору, а в точке А – внутренний зазор  $AA_1$  (рис. 14), который измерить сложно. Величина зазора  $AA_1$  зависит от выбранных режимов.

Для расчетов был применен программный комплекс МКЕ\_D (кафедра динамики и прочности машин Харьковского Национального Технического Университета «ХПИ»). По приведенной методике было выполнено численное исследование СТВ конкретных конструктивно – технологических параметров соединения с учетом физико-механических свойств деталей, втулок на вал главного циркуляционного насоса ГЦН-195М, кожухов на ряд типов толстостенных труб (в т.ч. с полисоединениями) и пр.

При этом сокращено время: нагрева (рис. 15) и передачи ОД на  $\Delta t_{нагр.} = 9100$  сек, установки в центрирующее приспособление прессы за счет применения схемы нагрева непосредственно на месте напрессовки с заранее подготовленной системой охлаждения выбранной зоны. Последнее позволило уменьшить до расчетного 8 сек период между стыковкой деталей и началом охлаждения. По старому варианту А нагрева (рис. 15) даже при длительной выдержке и вращении ОД температура верхней части (термопары: 1, 2, 3, 4) выше чем нижней (5, 6, 7, 8 и 9 – контрольная) на  $\Delta T_{нагр.} = 50^\circ\text{C}$ . Поэтому с учетом времени транспортирования и установки было выбрано  $T_{нагр.}^A = 420^\circ\text{C}$ , для нового варианта В достаточно  $T_{нагр.}^B = 370^\circ\text{C}$ . Доработка предложенной методики значительно расширит возможности исследований и позволит определить:

- влияние неравномерности температурного поля всего объема ОД;

- расчетные допуски на отклонения геометрической формы в поперечном и продольном сечениях, взаимного расположения базовых поверхностей;

- наличие остаточных деформаций (важно для финишных операций и маложестких деталей);

- дополнительные факторы для выбора вертикальной или горизонтальной схем СТВ;
- оценку вариантов при проработке на технологичность собираемых деталей и др.

### Выводы

Определены оптимальные режимы процессов СТВ, необходимость доработки нагревательного и прессового оборудования, оснащения его контрольно-измерительными приборами. Для пресса введена возможность регулирования усилия и параметров системы охлаждения.

Установлено, что:

- важно точно определять величину прижимающего осевого усилия, начало и конец его действия;
- требуется определение ограниченной зоны охлаждения ОД;
- необходимо срочно начать охлаждение этой зоны, т.к. схватывание по всей поверхности происходит в течении не более 90 сек;
- требуется сокращение до минимума промежутков времени на переходы полной операции СТВ: перемещение нагретой ОД, опускание в пресс, набор требуемого усилия и пр.

Такой подход гарантирует в условиях многономенклатурного пе-

риодически серийного изготовления крупных длинномерных узлов стабильно обеспечивать требования по беззачерному соединению.

### Список литературы:

1. Замятин В. К. Технология и оснащение сборочного производства машино-приборостроения. – М.: Машиностроение, 1995. – 608 с.

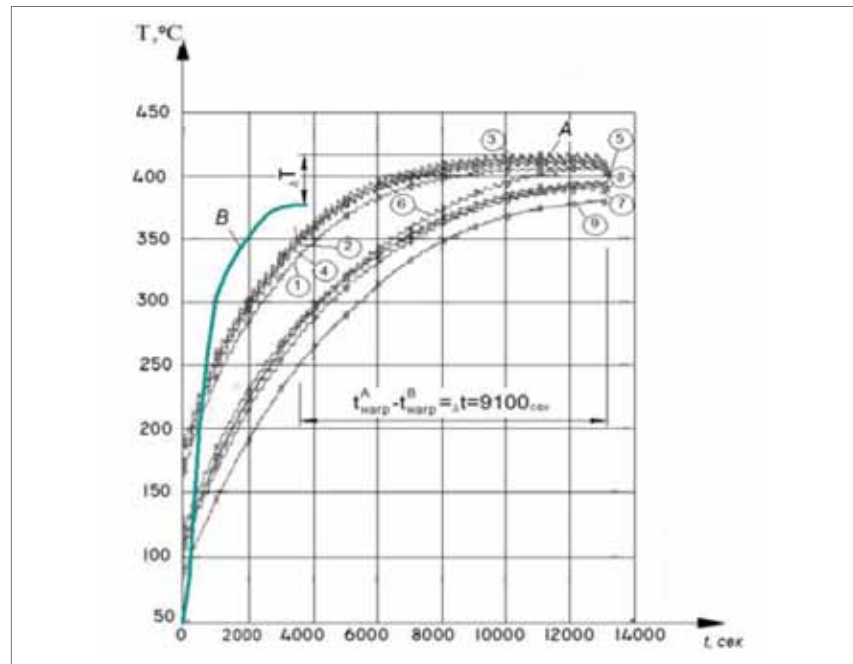
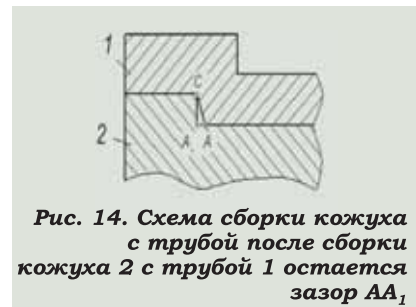


Рис. 15. Зависимость температуры ОД от времени нагрева: А – в электрической печи перед передачей на сборку; В – непосредственно на установочной позиции пресса

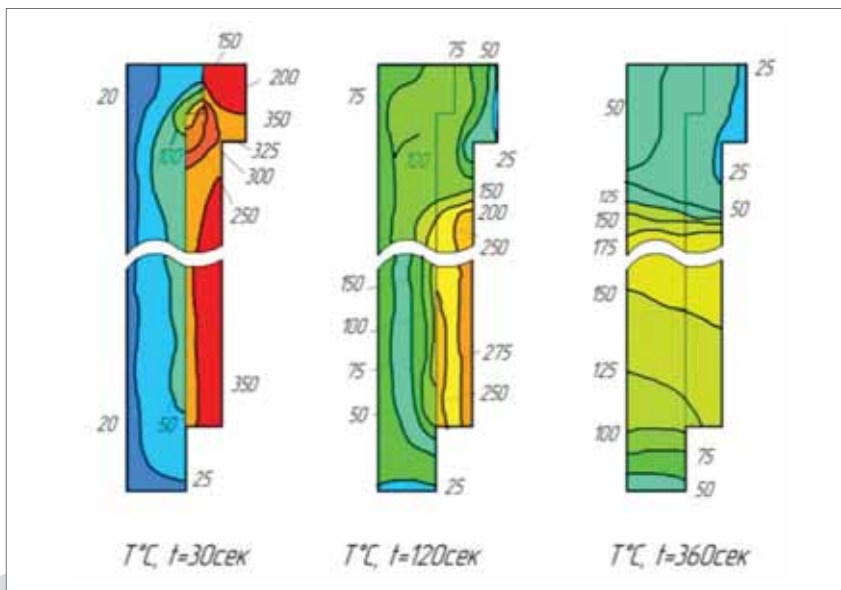


Рис. 13. Распределение температур в СТВ полисоединения с первым кожухом при минимальной зоне охлаждения

2. Зенкин А.С. Сборка неподвижных соединений термическими методами / А.С. Зенкин, Б.С. Арпентьев // М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.

3. Ястребова Н.А. Технология компрессостроения / Н.А. Ястребова, А.И. Кондаков, В.Д. Лубенец, А.Н. Виноградов // М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.

4. Кулиш Е. В. Решение конкретной задачи прессовых полисоединений / Е.В.Кулиш, Ю.В.Турьгин, Душан Мага // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2008. – № 1. – С. 33 - 40.

5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.