

*А.В. ЩЕПКИН, А.Г. АНДРЕЕВ***КИНЕТИКА НАПРЯЖЕННОГО И ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ СБОРКЕ С НАТЯГОМ**

Для сборки деталей с натягом, представляющих собой тела вращения, а также для бандажирования широко применяется тепловой метод, имеющий ряд преимуществ по сравнению с прессовой сборкой: обеспечивает большую прочность соединений, исключает повреждение сопрягаемых поверхностей, снижает количество брака, обеспечивает возможность автоматизации процесса сборки, допускает возможность разборки без повреждения сопрягаемых поверхностей. Автофретирование или бандажирование применяется в тех случаях, когда максимальные напряжения соизмеримы с пределом прочности материала детали, для увеличения рабочего давления при той же толщине стенки или уменьшения толщину стенки при том же давлении. В работе описан алгоритм для исследования кинетики напряженного и теплового состояния длинномерных сопрягаемых деталей при сборке с термоздействием, который заключается в попеременном решении нестационарной температурной задачи и вычислении напряженно-деформированного состояния и взаимном использовании получаемых данных. Создана имитационная модель предназначена для исследования сборки длинномерных конструкций, имеющих соединения с натягом и подвергающихся при эксплуатации импульсной нагрузке, обеспечивает выполнение технологических и прочностных требований к конструкции. Описано решение тестовой задачи. Проведено исследование процесса сборки длинномерной конструкции с упрочняющими кожухами. Рассчитана зависимость точности посадки от локального охлаждения кожухов и величины прижимающей силы. Результаты приводятся в форме таблиц и рисунков. Выполненные исследования позволяют проследить влияние параметров соединения на его прочность, наметить рациональные пути его упрочнения.

Ключевые слова: втулка, вал, посадка с натягом, геометрические аномалии, метод конечных элементов, автофретирование, бандажирование.

*О.В. ЩЕПКИН, А.Г. АНДРЕЄВ***КИНЕТИКА НАПРУЖЕНОГО І ТЕПЛООВОГО СТАНУ ДОВГОМІРНИХ ДЕТАЛЕЙ, З'ЄДНУВАНИХ З НАТЯГОМ**

Для з'єднання деталей – тіл обертання – с натягом, а також для бандажування широко застосовується тепловий метод, який має ряд переваг порівняно з пресовим складанням: забезпечує більшу міцність з'єднань, виключає пошкодження поверхонь, що сполучаються, знижує кількість браку, забезпечує можливість автоматизації процесу складання, допускає можливість розбандажування без пошкодження поверхонь, що сполучаються. Автофретування або бандажування застосовують тоді, коли максимальне напруження близькі до межі міцності матеріалу деталі, для збільшення робочого тиску при тій же товщині стінки або для зменшення товщини стінки при тому ж тиску. В роботі описаний алгоритм дослідження кинетики напруженого і теплового стану довгомірних деталей, які з'єднуються з застосуванням термовпливу. Алгоритм полягає в попереминому розв'язанні нестационарної температурної задачі та обчисленні напружено-деформованого стану зі взаємним використанням отримуваних даних. Створена імітаційна модель призначена для дослідження зборки довгомірних конструкцій, які мають з'єднання з натягом та піддаються під час експлуатації імпульсному навантаженню, забезпечує виконання технологічних і міцностних вимог до конструкції. Описано розв'язання тестової задачі. Проведено дослідження процесу складання довгомірної конструкції зі зміцнюючими кожухами. Розрахована залежність точності посадки від локального охолодження кожухів і величини притискаючої сили. Результати наводяться у вигляді таблиць та рисунків. Виконані дослідження дозволяють дослідити вплив параметрів з'єднання на його міцність, намітити раціональні шляхи його зміцнення.

Ключові слова: втулка, вал, посадка з натягом, геометричні аномалії, метод скінченних елементів.

*O.V. SCHEPKIN, A.G. ANDREEV***KINETICS OF THE STRENGTH AND THERMAL STATE OF LONG-SIZED INTERFACED DETAILS WITH TIGHTNESS APPLICATION**

The thermal method is widely used for the assembly of interference details, which are bodies of revolution, as well as for banding, which has a number of advantages compared to the press assembly: it provides greater strength of joints, eliminates damage to mating surfaces, reduces the amount of scrap, provides the ability to automate the assembly process, allows the ability to disassemble without damage to the mating surfaces. Autofrettage or bandaging is applied when the maximal pressure {voltage} are commensurable with strength of a material of a detail, for increase in working pressure at the same thickness of a wall or reduction thickness of a wall at the same pressure. The paper describes an algorithm for studying the kinetics of the stress and thermal state of long mated details during assembly with thermal action, which consists in the alternate decision of a non-stationary temperature problem {task} and calculation of the is intense-deformed condition and sharing of received data. The created simulation model is designed to study the assembly of long details that have interference fit and are subjected to a pulsed load during operation, ensures the fulfillment of technological and strength structural requirements. The decision of a test problem is described. It is carried out research of process of assembly of a lengthy design with strengthening casings. Dependence of accuracy of assembly on local cooling casings and sizes of pressing force is calculated. The results are presented in the form of tables and figures. The studies performed allow us to trace the influ-

© А.В. Щепкин, А.Г. Андреев, 2019

ence of the parameters of the compound on its strength, and outline rational ways of strengthening it.

Keywords: bush, shaft, interference fit, geometric anomaly, finite element method, autofrettage, bandaging.

Введение. Толстостенные цилиндры, работающие при высоких внутренних давлениях, являются распространенными элементами многих ответственных конструкций. В тех случаях, когда величина давления соизмерима с пределом прочности материала, повышение несущей способности может быть достигнуто автофретированием или с помощью бандажирования, то есть посадкой с натягом кожухов на основную конструкцию. Это позволяет увеличить рабочее давление при той же толщине стенки или уменьшить толщину стенки при том же давлении.

Соединения деталей с натягом широко применяются в машиностроении при больших динамических нагрузках и отсутствии необходимости в разборке.

1. Вопросом исследования посадки с натягом уделяется большое внимание. Это обусловлено распространенностью конструкций подобного класса в технике и спецификой расчетных исследований. В изучении посадок с натягом значительный вклад внесли такие ученые как Берникер Е.И., Антипин П.К., Борович Л.С., Тарабасов Н.Д., Щенятский А.В., Александров В.М., Чебаков М.И., Джонсон К.Л. и др.

В справочнике Палея М.А., Романова А.Б., Брагинского В.А. [1], пособия Дунаева П.Ф., Леликова О.П., Варламовой Л.П. [2], справочнике машиностроителя Ачеркана Н.С. [3], у Сателя Э.А. [4] и Берникера Е. И. [5] приведены методики и примеры расчета вероятных зазоров и натягов цилиндрических соединений, методика выбора посадок с натягом.

В статье Гаффанова Р.Ф., Щенятского А.В. [6] описан процесс формирования соединения термическим методом. Опыты показали, что из рассмотренных конструктивных и технологических методов управления погрешностью базирования деталей наиболее эффективным является применение дискретное изменение натяга, полученного за счет создания на поверхности втулки геометрических особенностей.

Среди фундаментальных работ по проблеме исследования прочности соединений с натягом следует указать работы Пригоровского Н.И. [7], Серенсена с.В. [8], Решетова Д.Н. [9], Берникера Е. И. [5].

Работы Зенкина А.С. [10], Балацкого Л.Т. [11, 12], Гречишева Е.С., Ильяшенко А.А. [13] посвящены технологическим аспектам проблемы. В книге Гричишева Е.С., Ильяшенко А.А. рассмотрены теория, расчет и конструирование цилиндрических и конических соединений с натягом, а также технология их изготовления. Большое внимание уделено прочности соединений при статических и переменных нагрузках. Приведены методики расчета прочности соединений и предельные нагрузки, которые передаются из условий отсутствия локального скольжения в зоне контакта.

Расчетным аспектам соединений с натягом посвящены работы Подгорного А.Н., Гонтаровского П.П. [14], Миллера В.С. [15]. Большинство работ по прочности соединений с натягом не учитывают сложные процессы взаимодействия деталей в контактной

зоне при эксплуатации, поэтому расчеты прочности таких конструкций дополняют проверочными расчетами с использованием эмпирических коэффициентов, основанных на экспериментальных данных.

2. Тепловой метод сборки. Для сборки деталей с натягом, представляющих собой тела вращения, а также для бандажирования широко применяется тепловой метод, имеющий ряд преимуществ по сравнению с прессовой сборкой [16]:

- обеспечивает большую прочность соединений;
- исключает повреждение сопрягаемых поверхностей;
- снижает количество брака;
- обеспечивает возможность автоматизации процесса сборки;
- допускает возможность разборки без повреждения сопрягаемых поверхностей.

При бандажировании конструкций с большой длиной бандажа параметры сборки могут оказывать существенное влияние на распределения контактных давлений и определять работоспособность конструкции в целом. В таких случаях возникает необходимость решения задачи кинетика напряженного и теплового состояния длинномерных сопрягаемых деталей при сборке с натягом [17].

3. Решение задачи НДС при наличии контактного взаимодействия элементов конструкций – тел вращения. Исследованиям НДС конструкций с помощью МКЭ посвящены тысячи книг, среди авторов которых можно Зенкевича О. [18, 19], Сегерлинда Л. [20], Постнова В.А., Хархурима И.Я. [21], Розина Л.А. [22], Образцова И. Ф. [23].

Наиболее удобным способом решения контактных задач МКЭ является использование специальных стыковочных элементов, моделирующих состояние сила-смещение на поверхностях раздела взаимодействующих тел [14]. В данной работе используются контактные элементы, соединяющие узлы контактирующих деталей. Такой контактный элемент содержит 2 узла с одинаковыми координатами, принадлежащими к смежным контактирующим телам. Для определения силы трения в элементе задаются узлы смежных контактных элементов, чтобы вся контактная поверхность была распределена между контактными элементами (рис. 1).

Характеристики элемента задаются в радиальном r и осевом z направлениях, типы характеристик: натяг, натяг-зазор, проскальзывание (в перпендикулярном направлении должен быть задан натяг-зазор), отсутствие взаимодействия. При наличии элементов типа натяг-зазор и проскальзывание расчет НДС становится итерационным до стабилизации состояния контактных элементов.

Элемент типа натяг-зазор имеет 2 состояния: «натяг» и «зазор». Исходное состояние может быть любым, однако необходимо исключить возможность

смещения каждой из деталей как жесткого целого. После определения напряжений и перемещений в конструкции, для элемента натяг-зазор в состоянии «натяг» контролируется значение силы между узлами: если действует растягивающая сила, элемент переключается в состояние «зазор», переключение хотя бы одного из контактных элементов требует выполнения расчета НДС заново. Сила в узле определяется как сумма сил в этом узле для обычных элементов. Для элемента в состоянии «зазор» контролируется значение перемещений узлов. Условие зазора имеет вид (рис. 2):

$$u_1 + \delta \leq u_2, \quad (1)$$

где u_1, u_2 – перемещения узлов элемента, δ – натяг. Нарушение условия приводит к переключению элемента в состояние «натяг».

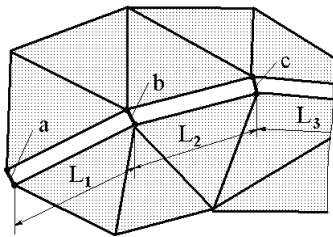


Рисунок 1 – Пример схемы распределения области контакта между контактными элементами a, b, c . Длина линии контакта для элемента a , находящегося на краю линии контакта составляет $L_1/2$, для элемента $b - L_1/2 + L_2/2$; для элемента $c - L_2/2 + L_3/2$

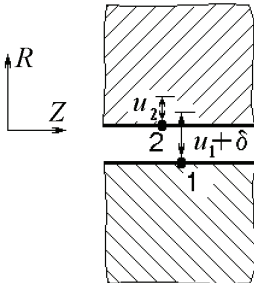


Рисунок 2 – Сохранение зазора в зоне контакта

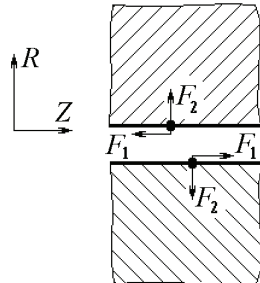


Рисунок 3 – Схема элемента проскальзывания

Элемент проскальзывания имеет состояния «контакт», «проскальзывание» и «отсутствие взаимодействия»; в перпендикулярном направлении этот элемент имеет тип натяг-зазор. Исходное состояние – «контакт». Если для силы сжатия в перпендикулярном направлении F_2 не выполняется условие

$$|F_2 f_i| > |F_1|, \quad (2)$$

то элемент переходит в состояние «проскальзывание» и силы F_1 в узлах заменяются на значение $|F_2 f|$, направление действия сохраняется; f – коэффициент трения (рис. 3). На следующей итерации фиксируется значение относительного смещения узлов в контактный элемент и он возвращается в состояние «контакт». Если элемент в перпендикулярном направлении переключается в состояние «зазор», элемент проскальзывания переходит в состояние «отсутствия взаимодействия».

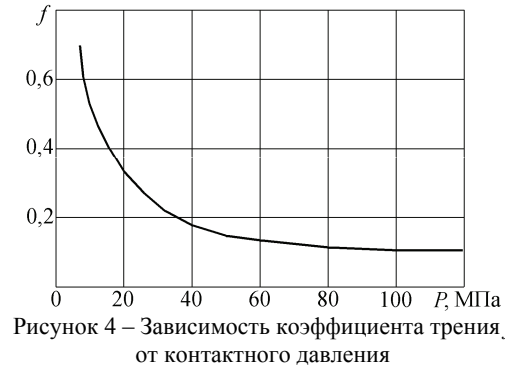


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента трения f от контактного давления

Поскольку коэффициент трения f зависит от величины контактного давления (рис. 4) [24], то формулу (2) следует применять в виде

$$\left| \int_S F_2 f(F_2) dS \right| \geq |F_1|, \quad (3)$$

где S – площадь зоны контакта. Коэффициент трения также зависит от качества обработки сопрягаемых поверхностей, наличия специальных покрытий, которые иногда наносятся на сопрягаемые поверхности.

4. Решение МКЭ нестационарной температурной контактной задачи для тел вращения. Решение температурной задачи МКЭ подробно изложено в монографии Сегерлинда Л. [20].

Контактному теплообмену деталей всегда сопутствует контактное термическое сопротивление R , величина которого при определенных условиях достигает большого значения. Согласно экспериментальным данным [15] величина контактного термического сопротивления может изменяться в 40-50 раз в зависимости от условий теплопередачи. Основными факторами, влияющими на теплопередачу, являются давлению в зоне контакта, чистота обработки соприкасающихся поверхностей и температура. При силах сжатия 50 МПа и выше заметного влияния температуры на термическое сопротивление не наблюдается. Термическое сопротивление обратно пропорционально силе сжатия, например, для материала Сталь 45 при силе сжатия 5 МПа сопротивление равно $443 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \text{град/Вт}$, при силе сжатия 50 МПа – $90 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \text{град/Вт}$, 100 МПа – $60 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \text{град/Вт}$ (чистота поверхностей $\nabla 3$).

Термическое контактное сопротивление удобно оценивать величиной эквивалентной толщины материала B , температурный перепад на которой соответствует температурному скачку в зоне контакта, то есть

$$R = B/K, \quad (4)$$

где K – коэффициент теплопроводности. Если рассматриваемый контактный элемент при расчете НДС находится в состоянии «зазор» то

$$B = B_G \frac{K_G}{K} + B_0, \quad (5)$$

где B_G, K_G – фактический зазор в точке контакта и теплопроводность газовой среды; если находится в состоянии «натяг» то эквивалентная толщина материала определяется эмпирической зависимостью от давления в зоне контакта и температуры (рис. 5)

$$B = B(P, t). \quad (6)$$

Расчет коэффициента теплообмена (теплоотдачи) h нагретой детали осуществляется с использованием эмпирических формул [25] и зависит от скорости воздушного потока, разности температур детали и окружающей среды. При водном охлаждении детали при температуре ее поверхности выше 100 град. происходит закипание воды, что повышает теплоотдачу при отводе пара от поверхности детали или снижает ее при скоплении пара у поверхности. При температуре детали ниже 100 град. коэффициент теплоотдачи зависит от скорости потока воды.

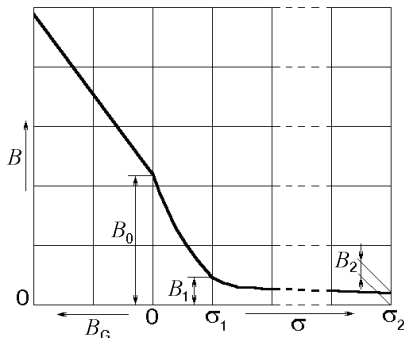


Рисунок 5 – Зависимость эквивалентной толщины B контактного элемента от давления в зоне контакта

5. Решение тестовой задачи. В качестве тестовой задачи выполнен расчет тепловой посадки бандажа на трубу (рис. 6). Бандаж после остывания должен быть вплотную к упору на трубе. При посадке бандаж нагревается до температуры $T = 350^\circ \text{C}$ и после посадки прижимается силой $F = 2,5 \text{ МН}$, диаметральный натяг в соединении $\delta = 0,6 \text{ мм}$. Взаимодействие между деталями происходит через контактные конечные элементы, действующими как при расчете напряженно-деформированного состояния, так и при решении нестационарной температурной задачи. Теплообмен с окружающей средой не учитывается. На рис. 7 приведена схема действующих нагрузок в момент времени $t = 0$ (начало сборки).

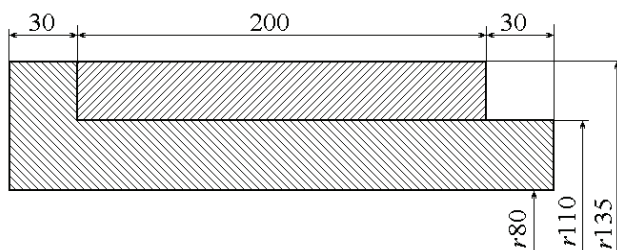


Рисунок 6 – Тестовая модель

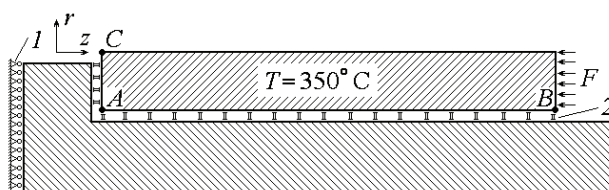


Рисунок 7 – Схема нагружения детали в момент времени $t = 0$. 1 – граничные условия, 2 – контактные элементы

Характеристики материала:
 – модуль упругости $E = 0,21 \cdot 10^6 \text{ МПа}$;
 – коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$;
 – коэффициент теплопроводности $\alpha = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$;
 – температура окружающей среды $T_0 = 20 \text{ град}$.;
 – удельная теплоемкость $c = 460 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}^2$;
 – коэффициент теплопроводности материала $K = 80 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$, воздуха – $K_g = 0,035 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$;
 – удельный вес $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$;
 – коэффициент трения $f = 0,15$;
 – термическое сопротивление в зоне контакта $R = 176 \cdot 10^{-6}$; $84 \cdot 10^{-6}$; $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$ (при нулевом сжимающем напряжении; при напряжении 10 МПа соответственно).

Все параметры материала не зависят от температуры.

Созданная расчетная схема для исследования кинетики напряженного и теплового состояния предполагает следующий порядок расчета:

1. Определение НДС в начальный момент времени $t = 0$;
2. Решение нестационарной температурной задачи продолжительностью 30 секунд с шагом по времени 5 секунд с использованием данных о НДС для вычисления параметров контактных элементов;
3. Определение НДС в текущий момент времени с использованием данных о распределении температур в конструкции;
4. Если разность между минимальной и максимальной температурой в конструкции превышает 15 градусов, переход к 2;
5. Определение НДС в остывшей конструкции.

Были проведены следующие расчеты:

1. посадка при действии силы F вплоть до уравновешивания температур в трубе и бандаже (4 мин.);
2. посадка при действии силы F в течении ограниченного времени (1 мин.);
3. имитация влияния местного нагрева, обусловленного посадкой следующего бандажа, на деформации уже посаженного бандажа.

5.1. Посадка бандажа при действии силы F вплоть до уравновешивания температур в конструкции.

Было проведено исследование напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе ее сборки под действием прижимающей силы $F = 2,5 \text{ МН}$ в течении 4 мин. На рис. 8 представлено распределение температур в конструкции в моменты времени 1,2,3,4 мин. с начала сборки. На рис. 9, 10 показано распределение сжимающих напряжений σ_r и напряжений сдвига τ_{rz} , действующих на бандаж в зоне контакта с трубой. Указанные напряжения получены из текущих параметров контактных КЭ. Если напряжения $\tau_{rz} < 0$, они «отодвигают» бандаж от упора. В результате действия напряжений сдвига снижается силовое воздействие бандажа на упор: в момент времени 1 мин. давление на упор равно 2,13 МН, 2 мин. – 1,12 МН, 3 мин. – 0,95 МН, 4 мин. – 0,96 МН. Длина бандажа (относительное перемещение точки В относительно

точки А) в остывшей конструкции уменьшилась на $74,2 \cdot 10^{-6}$ м; то есть бандаж сжат на $16,6 \cdot 10^{-6}$ м; сила давления на упор при этом равна нулю.

5.2. Посадка бандажа при действии силы F в течении 1 мин. Было проведено исследование напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе ее сборки под действием прижимающей силы $F = 2,5$ МН в течении 1 мин. Распределение температуры в конструкции близко к полученному в раз-

ле 5.1 (см. рис. 8). На рис. 11 показано распределение напряжений сдвига τ_{rz} , действующих на бандаж в зоне контакта с трубой. Начиная со второй минуты наблюдалось смещение бандажа по трубе в направлении от упора: 2 мин. – $27,5 \cdot 10^{-6}$ м, 3 мин. – $43,3 \cdot 10^{-6}$ м, 4 мин. – $44,4 \cdot 10^{-6}$ м, в остывшей конструкции – $45,0 \cdot 10^{-6}$ м. Длина бандажа в остывшей конструкции уменьшилась на $37 \cdot 10^{-6}$ м; то есть бандаж растянут на $20,6 \cdot 10^{-6}$ м.

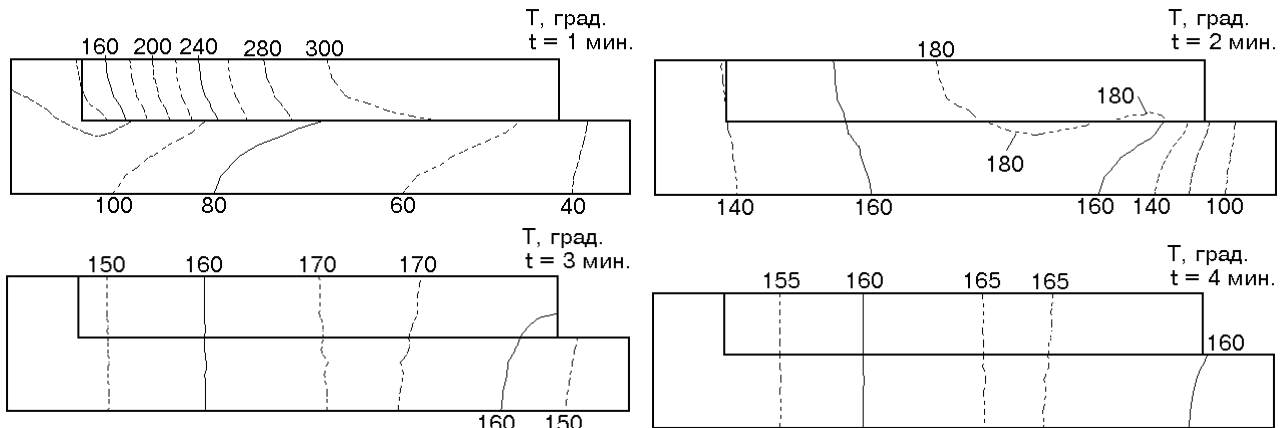


Рисунок 8 – Распределение температуры T в конструкции в процессе ее сборки

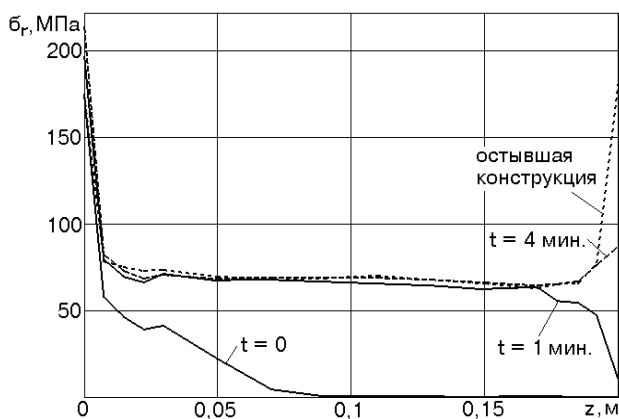


Рисунок 9 – Распределение сжимающих напряжений σ_{rz} , действующих на бандаж в зоне посадки на трубу при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН

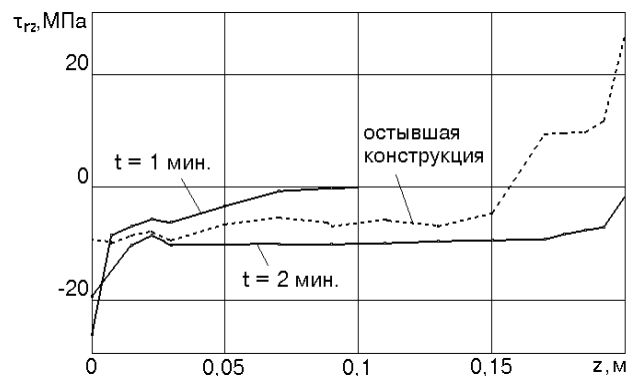


Рисунок 10 – Распределение напряжений сдвига τ_{rz} , действующих на бандаж в зоне посадки на трубу при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН

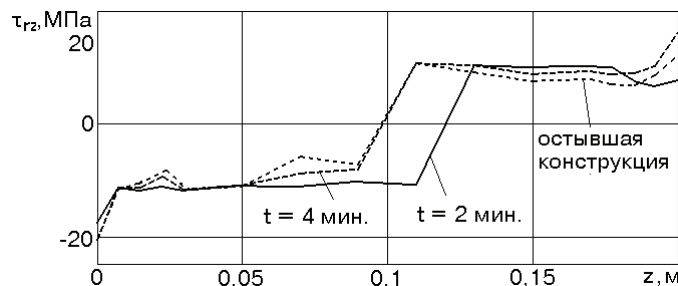


Рисунок 11 – Распределение напряжений сдвига τ_{rz} , действующих на бандаж в зоне посадки на трубу при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН только в течении первой минуты

5.3. Влияние на НДС посаженного бандажа посадки на трубу следующего бандажа. При посадке на трубу вплотную к предыдущему следующего бандажа происходит нагрев первого за счет теплопередачи. Термовоздействие имитировалось заданием в уз-

лах бандажа, смежных по следующим, температурных граничных условий $T = 350^\circ \text{C}$ продолжительностью 2 мин. Прижимающая силы отсутствовала или действовала 1 мин. На рис. 12 показана схема приложения нагрузок в конструкции. В результате теплопередачи

от первого бандажка ко второму происходит разъединение контактных элементов в первом бандаже и его деформация в зависимости от времени действия приложенной силы и параметров его посадки (см. разд. 5.1, 5.2).

На рис. 13 показано распределение температуры T в конструкции в процессе имитации посадки второго бандажка.

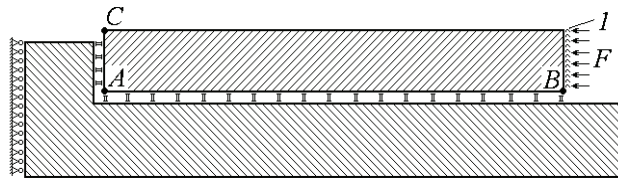


Рисунок 12 – Схема нагружения детали при $t = 0$.
 I – температурные граничные условия $T = 350^\circ\text{C}$

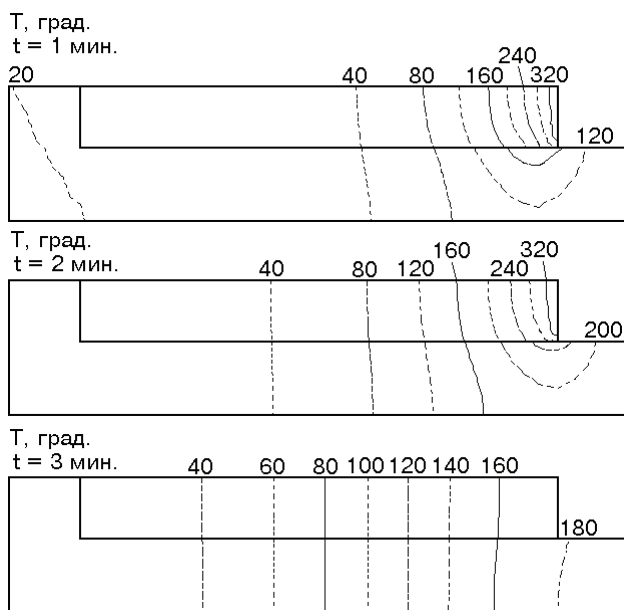


Рисунок 13 – Распределение температуры T в конструкции в процессе имитации посадки второго бандажка

6. Закономерности тепловой сборки деталей.

Выявлены следующие закономерности:

- схватывание бандажка с трубой начинается вблизи упора и через две минуты после сборки контакт происходит по всей поверхности деталей;

- через 4 мин. после сборки происходит выравнивание температур в деталях в радиальном направлении;

- выравнивание температур в деталях сопровождается относительным удлинением трубы и укорачиванием бандажка, возникающие при этом силы взаимодействия деталей «отодвигают» бандаж от упора, величина силы пропорциональна коэффициенту трения (см. разд. 5.1);

- в случае прекращения действия прижимающей силы до выравнивания температур в деталях происходит отрыв бандажка от упора (см. разд. 5.3);

- бандаж после посадки может быть как в растянутом, так и в сжатом состоянии, что зависит от величины и продолжительности действия прижимающей

силы;

- при посадке на трубу вплотную к предыдущему следующему бандажу происходит нагрев первого за счет теплопередачи, что приводит к разъединению контактных элементов в первом бандаже и его деформации в зависимости от параметров посадки первого и второго бандажка.

Итоговые данные по контакту между упором на трубе и бандажом представлены в табл. 1 (t – время, δ – расстояние между упором и бандажом, F_{AC} – сила, действующая на упор со стороны бандажка, t_F – время действия на бандаж прижимающей силы):

Таблица 1 – Смещение бандажка относительно упора δ ,
 F_{AC} сила, действующая на упор

t , мин.	$t_F = 4$ мин		$t_F = 1$ мин	
	δ	F_{AC} , МН	$\delta \cdot 10$, м	F_{AC} , МН
0	0	2,5	0	2,5
1	0	2,13	0	2,13
2	0	1,12	27,5	0
3	0	0,95	43,3	0
4	0	0,96	44,4	0
хол. констр.	0	0	45,0	0

Обеспечению посадки бандажка вплотную к упору трубы способствует снижение коэффициента трения, увеличение прижимающей силы. Прижимать бандаж следует вплоть до выравнивания температур в деталях в радиальном направлении, то есть 4-5 минут.

7. Исследование кинетики напряженного и теплового состояния длинномерной конструкции с упрочняющими кожухами. Исследуемая конструкция состоит из основной трубы и трех кожухов, посаженных на нее посадкой с натягом (рис. 14). При посадке кожух нагревается до температуры 400°C , одевается на трубу, после посадки прижимается силой $F = 2,5$ МН, диаметральный натяг в соединении – $0,6$ мм. Кожух охлаждается за счет воздушной конвекции и передает тепло трубе. Кожух после остывания должен быть вплотную к упору на трубе (к ранее установленному кожуху). Плотное соединение деталей обеспечивается прижимающей силой и водяным охлаждением части поверхности кожуха после сборки.

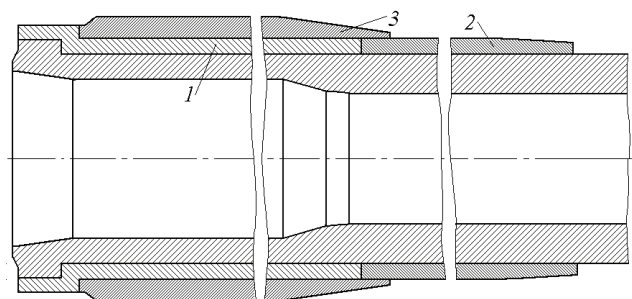


Рисунок 14 – Схема исследуемой конструкции.
 $1, 2, 3$ – кожухи

Характеристики материала:

- модуль упругости $E = 0,21 \cdot 10^6$ МПа;

- коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$;

– коэффициент температурного расширения
 $\alpha = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$;
 – температура окружающей среды $T_0 = 20 \text{ град.}$;
 – удельная теплоемкость $c = 460 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}^2$;
 – коэффициент теплопроводности материала
 $K = 28 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$, воздуха – $K_g = 0,035 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$;
 – удельный вес $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$;
 – коэффициент трения $f = 0,15$;
 – коэффициент теплообмена конструкции с воздушной средой $h = 6,0 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$, при водяном охлаждении детали при температуре ее поверхности выше 100 град. $h_1 = 20000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$, ниже 100 град. – $h_2 = 5000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$.

– термическое сопротивление в зонах контакта деталей между собой $R = 530 \cdot 10^{-6}$; $113 \cdot 10^{-6}$; $30 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$ (при нулевом сжимающем напряжении; при напряжениях 30 и 100 МПа соответственно).

Все параметры материала приняты не зависящими от температуры. Схема действующих нагрузок при посадке кожухов в момент времени $t = 0$ (начало сборки) приведена на рис. 15. Длина обандаженной части конструкции – около 2 м, внутренний диаметр – 0,12 м.

Созданная расчетная схема для исследования кинетики напряженного и теплового состояния предполагает следующий порядок расчета:

1. Определение НДС в начальный момент времени $t = 0$;
2. Решение нестационарной температурной задачи продолжительностью 10 секунд с шагом по времени 1 секунда с использованием данных о НДС для вычисления параметров контактных элементов;
3. Определение НДС в текущий момент времени с использованием данных о распределении температур в конструкции;
4. Если наблюдаются взаимные смещения контактирующих деталей, переход к 2;
5. Определение НДС в остывшей конструкции.

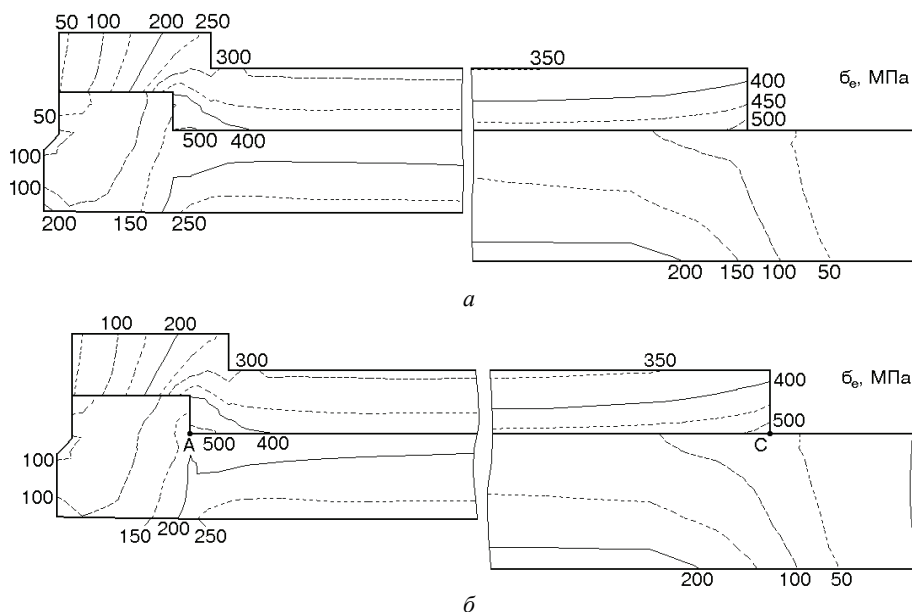


Рисунок 16 – Распределение эквивалентных напряжений σ_e в поперечном сечении трубы с одним посаженным кожухом в момент начала сборки (а) и в остывшей собранной конструкции (б) при действии прижимающей силы $F = 2,5 \text{ МН}$ и отсутствии водяного охлаждения

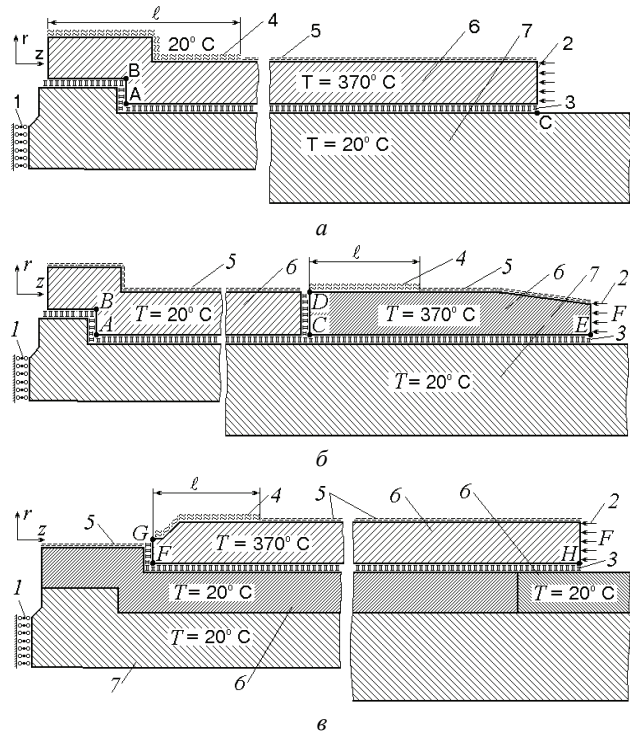


Рисунок 15 – Схема нагружения конструкции при посадке первого (а), второго (б) и третьего (в) кожуха: 1 – упор, 2 – прижимающая сила, 3 – контактные элементы, 4 – зона водяного охлаждения, 5 – зона воздушного охлаждения, 6 – кожух, 7 – труба

7.1. Посадка первого кожуха при действии прижимающей силы $F = 2,5 \text{ МН}$ и отсутствии водяного охлаждения детали. На рис. 16 представлено распределение эквивалентных напряжений σ_e в поперечном сечении трубы с одним посаженным кожухом в момент времени $t = 0$ (начало сборки).

На рис. 17 представлено распределение температур в конструкции в процессе сборки.

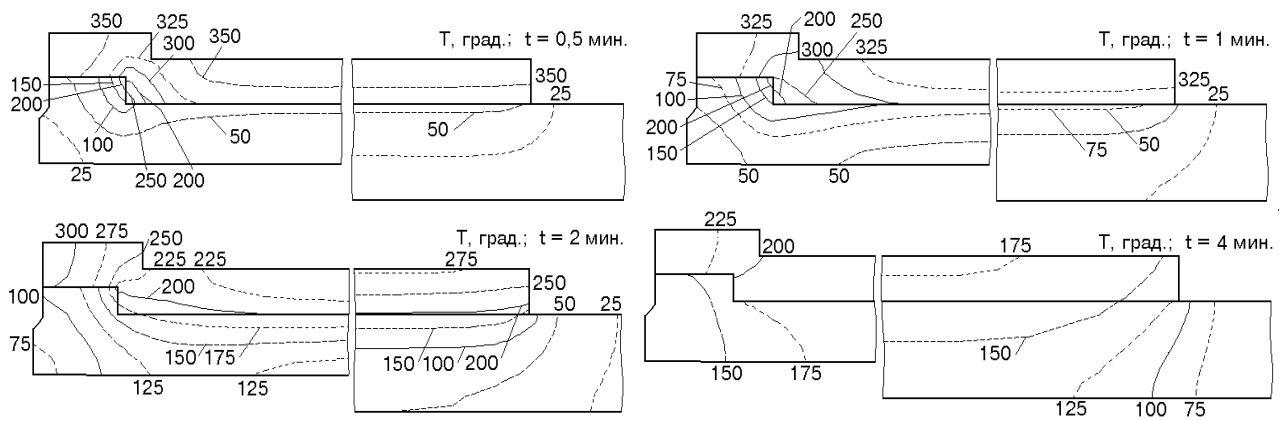


Рисунок 17 – Распределение температур в конструкции в процессе посадки первого кожуха при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и отсутствии водяного охлаждения

Согласно расчетным данным, схватывание деталей начинается в момент времени 1 мин. с начала сборки, в 2 мин. контакт наблюдается по всей поверхности между точками А, С (см. рис. 15, а). При этом осевая прижимающая сила F_{AB} , действующая на упор трубы со стороны кожуха уменьшается и в 2,5 мин. контакт между упором трубы и кожухом (поверхность А-В) теряется и появляется зазор, величина которого стабилизируется в 5-6 мин. с начала сборки. В процессе охлаждения конструкции за счет взаимного проскальзывания поверхность АВ кожуха, несмотря на действие прижимающей силы, перемещается от упора на величину 0,264-0,235 мм. Взаимные перемещения кожуха и трубы в точке С (δ_C) происходят в течение 7 мин. с начала сборки. После снятия прижимающей силы F вновь происходят взаимные перемещения деталей, в основном, вблизи точки С (см. табл. 2).

Таблица 2 – Данные о процессе посадки первого кожуха на трубу при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и отсутствии водяного охлаждения поверхности кожуха

t , мин.	$\delta_A \cdot 10^6$, м	$\delta_B \cdot 10^6$, м	F_{AB} , МН	$\delta_C \cdot 10^6$, м	T_{\max} , °С	σ_e макс., МПа
0 ($F=0$)	0	0	0	3478	370	0
0 ($F \neq 0$)	0	0	2,500	2890	370	288
0,5	0	0	2,500	2526	363	513
1	0	0	2,500	2146	348	464
1,5	0	0	2,210	1642	330	477
2	0	0	0,965	1045	311	423
2,5	65	32	0	688	292	437
3	85	62	0	322	274	469
4	132	106	0	-108	245	517
6	142	110	0	-271	208	542
8	142	109	0	-321	190	558
10	142	107	0	-325	188	570
хол. констр.	264	235	0	-253	–	539

7.2. Посадка первого кожуха при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и водяном охлаждении его поверхности. Было проведено исследование напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе посадки первого кожуха при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и длине зоны водяного охлаждения поверхности детали 0,2–0,35 м, начало охлаждения через 1 мин. после сборки, на-

чальная температура кожуха 370 град. Распределение напряжений в поперечном сечении трубы с одним посаженным кожухом после остывания аналогично приведенному в разд. 7.1. (см. рис. 16). На рис. 18 представлено распределение температур в конструкции в процессе сборки при длине зоны водяного охлаждения поверхности кожуха 0,2 м.

Согласно расчетным данным, схватывание деталей начинается в момент времени 1 мин. с начала сборки, в 2 мин. контакт наблюдается по всей поверхности между точками А, С. Осевая прижимающая сила F_{AB} , действующая на упор трубы со стороны кожуха уменьшается и поверхность АВ кожуха, несмотря на действие прижимающей силы, частично отрывается от упора. Взаимные перемещения кожуха и трубы в точке С (δ_C) происходят в течение 7 мин. с начала сборки. Охлажденная деталь перемещается от упора на величину 0,083-0,054 мм. После снятия прижимающей силы F вновь происходят взаимные перемещения деталей, в основном, вблизи точки С (см. табл. 3).

Таблица 3 – Данные о процессе посадки первого кожуха на трубу при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и длине зоны водяного охлаждения поверхности детали 0,2 м

t , мин.	$\delta_A \cdot 10^6$, м	$\delta_B \cdot 10^6$, м	F_{AB} , МН	$\delta_C \cdot 10^6$, м	T_{\max} , °С	σ_e макс., МПа
0 ($F=0$)	0	0	0	3478	370	0
0 ($F \neq 0$)	0	0	2,500	2890	370	288
0,5	0	0	2,500	2526	363	513
1	0	0	2,500	2146	348	464
1,5	0	0	1,838	1267	320	467
2	1	0	1,498	693	294	574
2,5	6	0	1,050	320	247	630
3	5	0	0,944	2	214	637
4	6	0	0,960	-383	195	635
5	10	0	0,795	-508	190	622
6	9	0	0,836	-558	189	607
8	9	0	0,872	-560	186	585
10	9	0	0,886	-560	185	577
хол. констр.	40	10	0	-497	–	534

В табл. 4-6 приведены данные о процессе соединения деталей в процессе сборки и для остывшей собранной конструкции при длине зоны водяного охлаждения поверхности детали 0,25; 0,3; 0,35 м. Распреде-

ление напряжений в конструкции в процессе сборки близко к представленному в разд. 7.1 (см. рис. 16). Распределение температур в конструкции в процессе сборки аналогично представленному на рис. 18.

Таблица 4 – Данные о процессе посадки первого кожуха на трубу при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и длине зоны водяного охлаждения поверхности детали 0,25 м

t , мин.	$\delta_A \cdot 10^6$, м	$\delta_B \cdot 10^6$, м	F_{AB} , МН	$\delta_C \cdot 10^6$, м	$T_{\text{макс.}}$, °C	$\sigma_{\text{е макс.}}$, МПа
0 ($F=0$)	0	0	0	3478	370	0
0 ($F \neq 0$)	0	0	2,500	2890	370	288
0,5	0	0	2,500	2526	363	513
1	0	0	2,500	2146	348	464
1,5	3	0	1,348	116	320	450
2	5	0	1,086	552	294	585
2,5	5	0	1,070	146	247	628
3	6	0	1,064	-150	214	626
4	6	0	1,098	-505	194	611
5	6	0	1,172	-609	189	594
6	5	0	1,216	-641	187	584
8	5	0	1,254	-641	183	573
10	5	0	1,261	-679	179	568
хол. констр.	9	0	0,486	-614	-	542

Таблица 5 – Данные о процессе посадки первого кожуха на трубу при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и длине зоны водяного охлаждения поверхности детали 0,3 м

t , мин.	$\delta_A \cdot 10^6$, м	$\delta_B \cdot 10^6$, м	F_{AB} , МН	$\delta_C \cdot 10^6$, м	$T_{\text{макс.}}$, °C	$\sigma_{\text{е макс.}}$, МПа
0 ($F=0$)	0	0	0	3478	370	00
0 ($F \neq 0$)	0	0	2,500	2890	370	288
0,5	0	0	2,500	2526	363	513
1	0	0	2,500	2146	348	464
1,5	4	0	1,139	1023	320	454
2	17	0	0,888	460	294	594
2,5	7	0	0,873	67	248	635
3	7	0	0,887	-213	214	629
4	8	0	0,972	-542	194	609
5	7	0	1,053	-644	187	593
6	7	0	1,110	-700	184	581
8	7	0	1,176	-702	178	569
10	7	0	1,204	-702	174	565
хол. констр.	10	0	0,554	-643	-	531

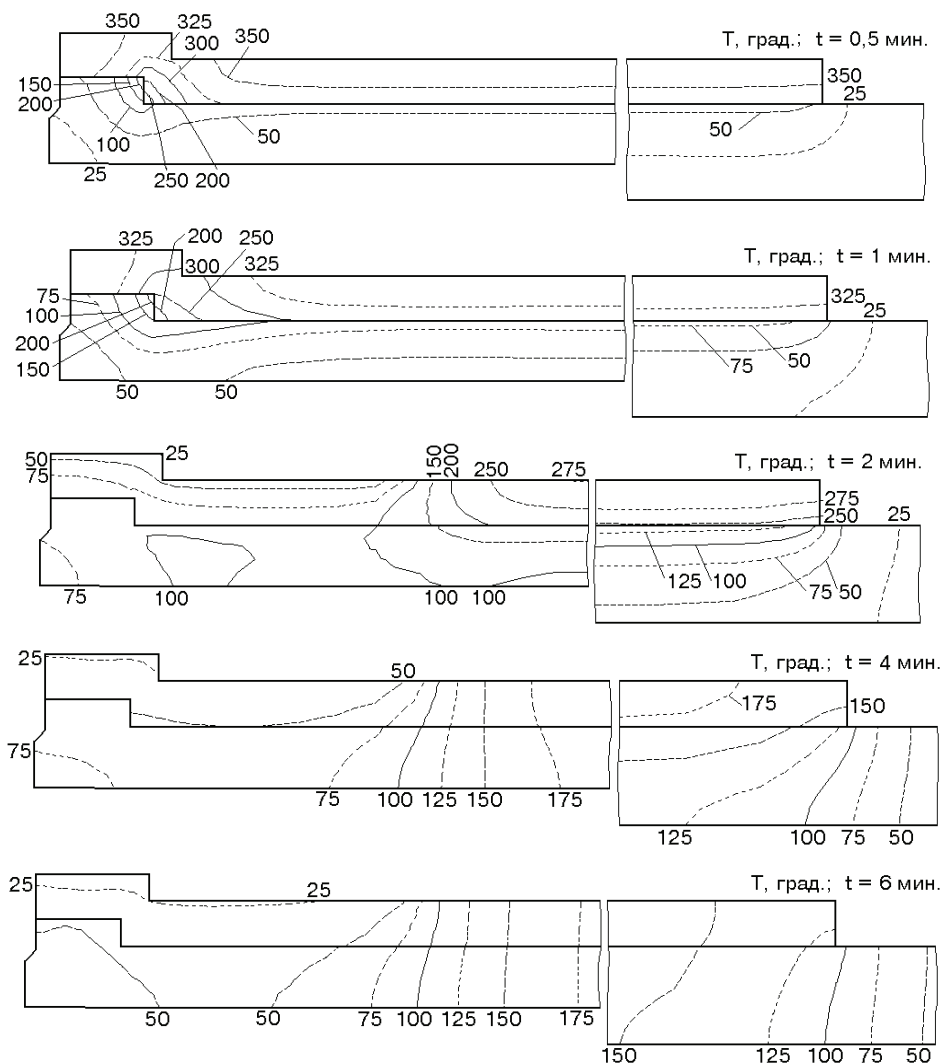


Рисунок 18 – Распределение температур в конструкции в процессе посадки первого кожуха при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и длине зоны водяного охлаждения поверхности кожуха 0,2 м

Таблица 6 – Данные о процессе посадки первого кожуха на трубу при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и длине зоны водяного охлаждения поверхности детали 0,35 м

t , мин.	$\delta_A \cdot 10^6$, м	$\delta_B \cdot 10^6$, м	F_{AB} , МН	$\delta_C \cdot 10^6$, м	T_{\max} , °С	σ_e макс., МПа
0 ($F=0$)	0	0	0	3478	370	0
0 ($F \neq 0$)	0	0	2,500	2890	370	288
0,5	0	0	2,500	2526	363	513
1	0	0	2,500	2146	348	464
1,5	13	0	0,407	951	320	466
2	16	0	0,477	350	294	600
2,5	18	0	0,473	5	247	640
3	18	0	0,492	-279	214	631
4	17	0	0,600	-605	190	609
5	17	0	0,689	-715	181	591
6	17	0	0,774	-763	176	577
8	15	0	0,826	-765	170	577
10	16	0	0,848	-765	166	557
хол. констр.	20	0	0,327	-700	–	526

7.3. Посадка второго кожуха. На рис. 19 представлено распределение эквивалентных напряжений σ_e в поперечном сечении трубы с двумя посаженными кожухами в момент времени $t=0$ (начало посадки второго кожуха) при действии прижимающей силы

$F = 2,5$ МН и отсутствии водяного охлаждения детали. На рис. 20 представлено распределение температур в конструкции в процессе сборки.

Согласно расчетным данным, схватывание деталей начинается в момент времени 1 мин. с начала сборки, в 2 мин. контакт наблюдается по всей поверхности между точками C , E . При этом осевая прижимающая сила F_{CD} , действующая на упор трубы со стороны кожуха уменьшается и в 2 мин. контакт между кожухами (поверхность $C-D$) теряется и появляется зазор, величина которого стабилизируется в 7-8 мин. с начала сборки. В процессе охлаждения конструкции за счет взаимного проскальзывания поверхность CD кожуха, несмотря на действие прижимающей силы, перемещается от упора на величину 1,2 мм. Взаимные перемещения кожуха и трубы в точке C (δ_C) происходят в течение 9-10 мин. с начала сборки. После снятия прижимающей силы F вновь происходят взаимные перемещения деталей, в основном, вблизи точки E (см. табл. 7). Тепловое воздействие на первый кожух приводит к его перемещению в осевом направлении и снижению осевых сжимающих напряжений σ_z в первом кожухе вблизи поверхности CD .

Таблица 7 – Данные о процессе посадки второго кожуха на трубу при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и отсутствии водяного охлаждения поверхности кожуха

t , мин.	$\delta_A \cdot 10^6$, м	$\delta_B \cdot 10^6$, м	F_{AB} , МН	$\delta_C \cdot 10^6$, м	$\delta'_C \cdot 10^6$, м	$\delta_D \cdot 10^6$, м	F_{CD} , МН	$\delta_E \cdot 10^6$, м	T_{\max} , °С	σ_e макс., МПа
0 ($F=0$)	10	0	0,565	-643	0	11	0	4835	370	530
0 ($F \neq 0$)	7	0	1,194	-722	0	0	2,500	3841	370	556
0,5	7	0	1,194	-699	0	0	2,500	3262	359	552
1	7	0	1,194	-691	2	0	2,476	2608	338	552
1,5	7	0	1,194	-670	0	0	1,503	2353	314	636
2	7	0	1,194	-560	78	74	0	1922	261	704
2,5	7	0	1,194	-563	391	393	0	1450	219	725
3	7	0	1,194	-566	668	668	0	1042	197	722
4	7	0	1,194	-568	915	915	0	422	174	752
5	7	0	1,194	-568	976	975	0	59	165	709
6	7	0	1,194	-568	981	981	0	-91	161	702
8	7	0	1,194	-568	1015	1015	0	-152	159	692
10	7	0	1,194	-569	1016	1016	0	-155	158	691
хол. констр.	10	0	0,603	-613	1207	1209	0	-46	–	530

Таблица 8 – Данные о процессе посадки второго кожуха на трубу при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и длине зоны водяного охлаждения поверхности детали 0,3 м

t , мин.	$\delta_A \cdot 10^6$, м	$\delta_B \cdot 10^6$, м	F_{AB} , МН	$\delta_C \cdot 10^6$, м	$\delta'_C \cdot 10^6$, м	$\delta_D \cdot 10^6$, м	F_{CD} , МН	$\delta_E \cdot 10^6$, м	T_{\max} , °С	σ_e макс., МПа
0 ($F=0$)	10	0	0,565	-643	0	0	0	4835	370	530
0 ($F \neq 0$)	7	0	1,194	-722	0	0	2,500	3841	370	556
0,5	7	0	1,194	-699	0	0	2,500	3262	359	552
1	7	0	1,194	-691	2	0	2,476	2608	338	552
1,5	7	0	1,194	-632	0	20	0,456	1748	316	625
2	7	0	1,194	-612	9	28	0	1198	260	671
2,5	7	0	1,194	-597	139	157	0	665	219	692
3	7	0	1,194	-597	215	215	0	215	196	699
4	7	0	1,194	-597	302	309	0	-442	174	704
5	7	0	1,194	-597	302	305	0	-770	165	663
6	7	0	1,194	-597	307	311	0	-903	161	680
8	7	0	1,194	-597	306	306	0	-940	159	691
10	7	0	1,194	-597	305	299	0	-940	158	692
хол. констр.	10	0	0,557	-623	427	429	0	-834	–	530

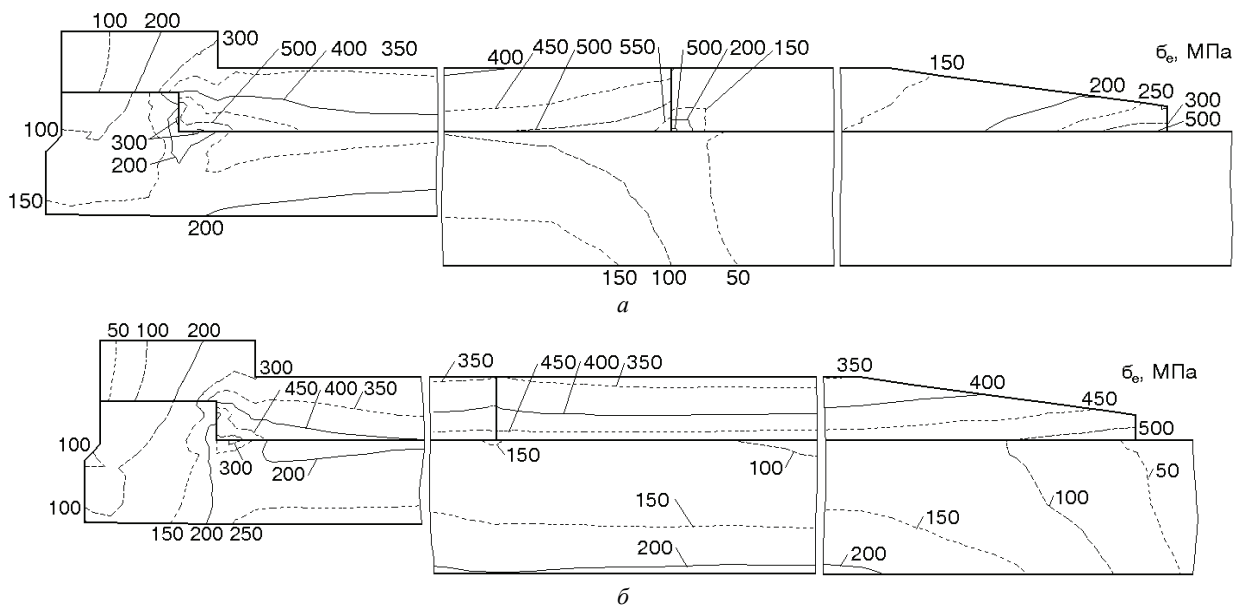


Рисунок 19 – Распределение эквивалентных напряжений σ_e в поперечном сечении трубы с двумя посаженными кожухами в момент начала сборки (а) и в остывшей собранной конструкции (б) при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и отсутствии водяного охлаждения

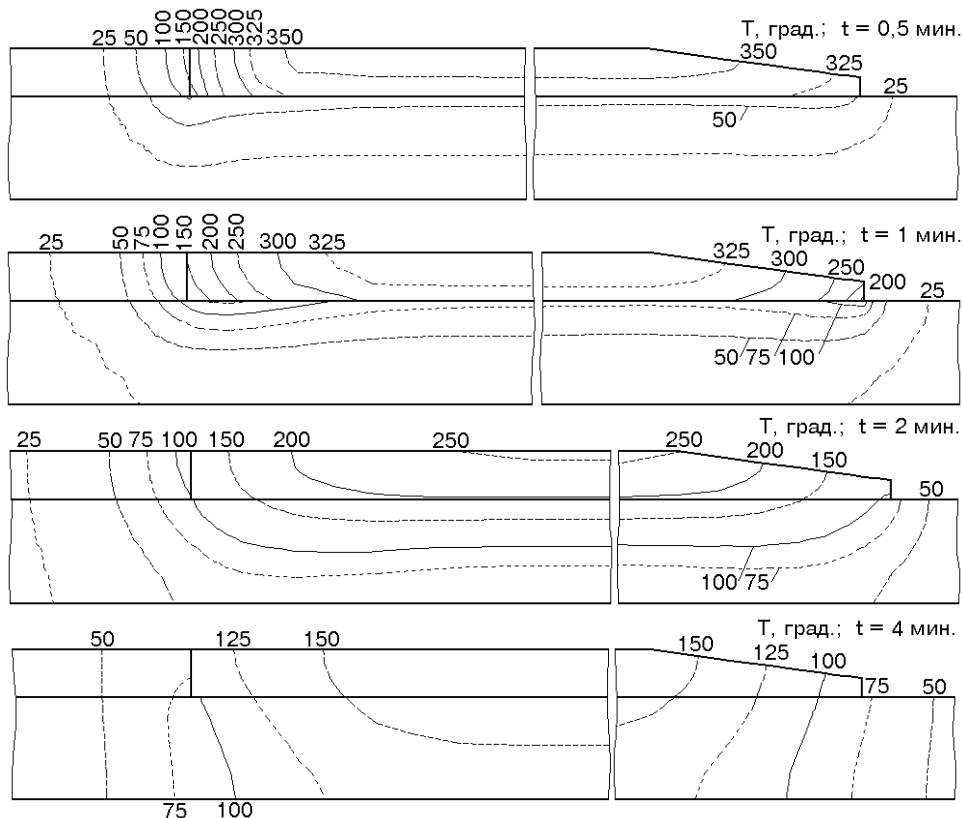


Рисунок 20 – Распределение температур в конструкции в процессе посадки второго кожуха при действии прижимающей силы $F = 2,5$ МН и отсутствии водяного охлаждения

Было проведено исследование НДС конструкции в процессе посадки второго кожуха при длине зоны водяного охлаждения поверхности детали 0,3 м, начало охлаждения через 1 мин. после сборки, начальная температура кожуха 370 град. Схватывание деталей начинается в момент времени 1 мин. с начала сборки, в 2 мин. контакт наблюдается по всей поверхности между точками А, С. При этом поверхность CD кожуха,

несмотря на действие прижимающей силы, частично отрывается от упора на 0,4 мм. Взаимные перемещения кожуха и трубы в точке С (δ'_C) происходят в течение 7 мин. с начала сборки. После снятия прижимающей силы F вновь происходят взаимные перемещения деталей, в основном, вблизи точки Е (см. табл. 8).

Также было проведено исследование НДС конструкции в процессе посадки второго кожуха при дейст-

вии прижимающей силы, увеличенной до 3-4,5 МН, длине зоны водяного охлаждения поверхности детали 0,3 м, начало охлаждения через 1 мин. после сборки, начальная температура кожуха 370 град.

Согласно расчетным данным, для обеспечения посадки детали, величина прижимающей силы должна

быть 4 – 4,5 МН, длина зоны водяного охлаждения – 0,3 м. Данные о процессе посадки второго кожуха приведены в табл. 9. Распределение напряжений в поперечном сечении трубы после остывания аналогично приведенному на рис. 19.

Таблица 9 – Данные о процессе посадки второго кожуха на трубу при действии прижимающей силы $F = 4$ МН и длине зоны водяного охлаждения поверхности детали 0,3 м

t , мин.	$\delta_A \cdot 10^6$, м	$\delta_B \cdot 10^6$, м	F_{AB} , МН	$\delta_C \cdot 10^6$, м	$\delta'_C \cdot 10^6$, м	$\delta_D \cdot 10^6$, м	F_{CD} , МН	$\delta_E \cdot 10^6$, м	T_{\max} , °С	$\sigma_{\text{е макс}}$, МПа
0 ($F = 0$)	10	0	0,565	-809	0	0	0	4835	370	530
0 ($F \neq 0$)	5	0	1,650	-729	0	0	4,000	3287	370	688
0,5	5	0	1,650	-716	0	0	4,000	2731	360	688
1	5	0	1,650	-714	0	0	4,000	2142	341	701
1,5	5	0	1,650	-639	0	0	1,983	1276	321	828
2	5	0	1,650	-627	0	0	1,558	658	263	864
2,5	5	0	1,650	-601	0	0	1,203	19	230	880
3	5	0	1,650	-583	0	0	0,982	-485	202	878
4	5	0	1,650	-584	0	0	1,043	-1217	176	877
5	5	0	1,650	-583	0	0	1,110	-1581	166	846
6	5	0	1,650	-583	0	0	1,197	-1667	161	865
8	5	0	1,650	-583	0	0	1,321	-1708	159	850
10	5	0	1,650	-583	0	0	0	-1434	158	792
хол. констр.	10	0	0,555	-584	8	8	0	-1252	-	531

Выводы. При посадке первого кожуха, согласно расчетным данным, схватывание деталей начинается в момент времени 1 мин. с начала сборки, в 2 мин. контакт наблюдается по всей поверхности между точками A , C (см. рис. 15, a). Смещение кожуха относительно упора трубы (см. табл. 10; δ_A , δ_B в точках A , B) при отсутствии водяного охлаждения продолжается 5-6 мин., при его наличии – 2 мин. Взаимные перемещения кожуха и трубы в точке C (δ_C) происходят 7-8 мин. с начала сборки. После снятия прижимающей силы F вновь происходят взаимные перемещения деталей, в основном, вблизи точки C . Согласно расчету процесса сборки без учета сил трения кожух после посадки растянут в осевом направлении, если $\delta_A - \delta_C \leq 0,644$ м. Однако, за счет действия сил трения кожух растянут неравномерно и участок длиной 0,2 – 0,25 м вблизи места приложения силы остается сжатым после сборки и снятия прижимающей силы.

Таблица 10 – Взаимные осевые перемещения трубы и первого кожуха при их сборке в зависимости от длины зоны водяного охлаждения кожуха L

L , м	$\delta_A \cdot 10^6$, м	$\delta_B \cdot 10^6$, м	$\delta_C \cdot 10^6$, м	F_{AB} , МН
0	264	235	-253	0
0,20	40	10	-497	0
0,25	9	0	-614	0,486
0,30	10	0	-643	0,554
0,35	20	0	-700	0,327

При посадке на трубу первого кожуха прижимающая сила в 2,5 МН оказывается недостаточной для гарантированной посадки кожуха вплотную к упору (см. разд. 7.1); согласно расчету, разрыв составляет около 0,2 мм. Применение водяного охлаждения части поверхности кожуха обеспечивает качество сборки, рекомендуемая длина зоны охлаждения L составляет 0,25-0,35 м (см. табл. 10). F_{AB} – величина силы, дейст-

вующей на упор трубы на поверхности A - B со стороны кожуха в остывшей конструкции.

При посадке второго кожуха, согласно расчетным данным, схватывание деталей начинается в момент времени 1 мин. с начала сборки, в 2 мин. контакт наблюдается по всей поверхности между точками C , D (см. рис. 15, b). Прижимающая сила в 2,5 МН оказывается недостаточной для гарантированной посадки кожуха вплотную к первому (см. табл. 11; δ'_C , δ_D в точках C , D); согласно расчету, разрыв составляет около 1,2 мм. Применение водяного охлаждения части поверхности кожуха улучшает качество сборки, рекомендуемая длина зоны охлаждения L составляет 0,3 м, разрыв между кожухами может быть сокращен до 0,43 мм. Согласно расчетным данным, для обеспечения посадки детали, величина прижимающей силы должна быть увеличена до 4-4,5 МН, длина зоны водяного охлаждения – 0,3 м.

Таблица 10 – Взаимные осевые перемещения трубы и второго кожуха при их сборке в зависимости от длины зоны водяного охлаждения кожуха L и величины прижимающей силы F

L , м	F , МН	$\delta'_C \cdot 10^6$, м	$\delta_D \cdot 10^6$, м	$\delta_E \cdot 10^6$, м	F_{CD} , МН	σ_E , МПа	σ'_E , МПа
0	2,5	1207	1209	-46	0	708	346
0,2	2,5	791	792	-490	0	708	346
0,3	2,5	427	429	-834	0	708	346
0,4	2,5	525	524	-676	0	708	346
0,3	3,0	297	301	-1098	0	849	415
0,3	3,5	215	215	-1252	0	920	484
0,3	4,0	8	8	-1487	0	991	554
0,3	4,5	0	0	-1777	0,149	1132	623

Список литературы

1. Палей М.А., Романов А.Б., Брагинский В.А. Допуски и посадки: Справочник: В 2 ч. Ч. 1. Санкт-Петербург: Политехника, 2001. 576 с.
2. Дунаев П.Ф., Леликов О.П., Варламова Л.П. Допуски и посадки. Обоснование выбора: Учеб. пособие для студен-

тов машиностроительных вузов. Москва: Высшая школа, 1984. 112 с.

3. Справочник машиностроителя. В 6 т. Т. 4. / Под ред. Н.С. Ачеркан. Москва: Машгиз, 1955. 855 с.

4. Справочник машиностроителя. В 6 т. Т. 6. / Под ред. Э.А. Сател'. Москва: Машгиз, 1956. 512 с.

5. Берникер Е.И. Посадки с натягом в машиностроении. Москва-Ленинград: Машиностроение, 1968. 168 с.

6. Гаффанов Р.Ф., Шенятский А.В. Управление процессом формировании соединения с натягом, собираемого термическим методом. Вестник Ижевского государственного технического университета. Ижевск: ИжГТУ, 2008. № 3 (39). С. 9-12.

7. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. Москва: Машиностроение, 1983. 248 с.

8. Серенсен С.В., Козаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Москва: Машгиз, 1963. 452 с.

9. Решетов Д.Н. Детали машин. Москва: Машиностроение, 1974. 654 с.

10. Зенкин А.С., Арпентьев Б.М. Сборка неподвижных соединений термическими методами. Москва: Машиностроение, 1987. 128 с.

11. Балацкий Л.Т. Усталость валов в соединениях. Киев: Техніка, 1972. 180 с.

12. Балацкий Л.Т. Прочность прессовых соединений. Киев: Техника, 1982. 151 с.

13. Гречишев Е.С., Ильяшенко А.А. Соединения с натягом: расчеты, проектирование, изготовление. Москва: Машиностроение, 1981. 247 с.

14. Подгорный А.Н., Гонтаровский П.П., Киркач Б.Н. и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. Киев: Наукова думка, 1989. 232 с.

15. Миллер В.С. Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин. Киев: Наукова думка, 1966. 164 с.

16. Андреев Г.Я. Тепловая сборка колесных пар. Харьков: Изд-во Харьк. университета, 1965. 227 с.

17. Щепкин А.В. Кинетика напряженного и теплового состояния длинномерных сопрягаемых деталей при сборке с термовоздействием. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. работ. Темат. выпуск: Динамика и прочность машин. Харьков: НТУ «ХПИ». 2002. Вып. 9, т. 9. С. 133-140.

18. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Москва: Мир, 1975. 541 с.

19. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред. Москва: Недра, 1974. 239 с.

20. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Москва: Мир, 1979. 392 с.

21. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Ленинград: Судостроение, 1974. 344 с.

22. Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. Москва: Стройиздат, 1977. 129 с.

23. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. Москва: Высшая школа, 1985. 392 с.

24. Борович Л.С. Бесшпоночное соединение деталей машин. Москва: Машгиз, 1951. 129 с.

25. Михеев М.А. Основы теплопередачи. Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1956. 392 с.

Bibliography (transliterated)

1. Palej M.A., Romanov A.B., Braginskij V. A. Dopuski i posadki: Spravochnik: In 2 vol. Vol. 1. Sankt-Petersburg: Polith-

nika, 2001. 576 p.

2. Dunaev P.F., Lelikov O.P., Varlamova L.P. Dopuski i posadki. Obosnovanie vybora: Ucheb. posobie dlya studentov mashinostroitel'nyh vuzov. Moscow: Vysshaya shkola, 1984. 112 p.

3. Spravochnik mashinostroitel'ya. In 6 vol. Vol. 4. / Pod red. N.S. Acherkan. Moscow: Mashgiz, 1955. 855 p.

4. Spravochnik mashinostroitel'ya. In 6 vol. Vol. 6. / Pod red. E.A. Satel'. Moscow: Mashgiz, 1956. 512 p.

5. Berniker E.I. Posadki s natyagom v mashinostroenii. Moscow-Leningrad: Mashinostroenie, 1968. 168 p.

6. Gaffanov R.F., Schenyatskij A.V. Upravlenie processom formirovaniy soedineniya s natyagom, sobiraemogo termicheskim metodom. Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Izhevsk: IzhGTU, 2008. № 3 (39). P. 9-12.

7. Prigorovskij N.I. Metody i sredstva opredeleniya polej deformacij i napryazhenij. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 248 p.

8. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shnejderovich R.M. Nesuschaya sposobnost' i raschety detalej mashin na prochnost'. Moscow: Mashgiz, 1963. 452 p.

9. Reshetov D.N. Detali mashin. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 654 p.

10. Zenkin A.S., Arpent'ev B.M. Sborka nepodvizhnyh soedinenij termichesкими методами. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 128 p.

11. Balackij L.T. Ustalost' valov v soedineniyah. Kyiv: Tehnika, 1972. 180 p.

12. Balackij L.T. Prochnost' pressovyh soedinenij. Kyiv: Tehnika, 1982. 151 p.

13. Grechishev E.S., Ilyashenko A.A. Soedineniya s natyagom: raschety, proektirovanie, izgotovlenie. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 247 p.

14. Podgornyj A.N., Gontarovskij P.P., Kirkach B.N. and others Zadachi kontaktnogo vzaimodejstviya elementov konstrukcij. Kyiv: Naukova dumka, 1989. 232 p.

15. Miller V.S. Kontaktnyj teploobmen v elementah vysokotemperaturnykh mashin. Kyiv: Naukova dumka, 1966. 164 p.

16. Andreev G.Ya. Teplovaya sborka kolesnyh par. Kharkiv: Izd-vo Khark. universiteta, 1965. 227 p.

17. Schepkin O.V. Kinetika napryazhennogo i teplovogo sostoyaniya dlinnomernykh sopryagaemykh detalej pri sborke s termovozdeystviem. Vestnik NTU "KhPI": Sb. nauch. rabot. Temat. vypusk: Dinamika i prochnost' mashin. Kharkiv: NTU "KhPI". 2002. No 9, vol. 9. P. 133-140.

18. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tehnikе. Moscow: Mir, 1975. 541 p.

19. Zenkevich O., Chang I. Metod konechnykh elementov v teorii sooruzhenij i mehanike sploshnyh sred. Moscow: Nedra, 1974. 239 p.

20. Segerlind L. Primenenie metoda konechnykh elementov. Moscow: Mir, 1979. 392 p.

21. Postnov V.A., Harhurim I.Ya. Metod konechnykh elementov v raschetah sudovyh konstrukcij. Leningrad: Sudostroenie, 1974. 344 p.

22. Rozin L.A. Metod konechnykh elementov v primenenii k uprugim sistemam. Moscow: Strojizdat, 1977. 129 p.

23. Obracov I.F., Savel'ev L.M., Hazanov H.S. Metod konechnykh elementov v zadachah stroitel'noj mehaniki letatel'nyh apparatov. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 392 p.

24. Borovich L.S. Besshponochnoe soedinenie detalej mashin. Moscow: Mashgiz, 1951. 129 p.

25. Miheev M.A. Osnovy teploperedachi. Moskva-Leningrad: Gosenergoizdat, 1956. 392 p.

Поступила (received) 12.10.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Щепкін Олександр Віталійович (Щепкин Александр Витальевич, Schepkin Oleksandr Vitalijovyč) – наук. співр. кафедри «Динаміка та міцність машин» НТУ «ХПІ», e-mail: Sah4199@ukr.net.

Андреев Арнольд Георгійович (Андреев Арнольд Георгиевич, Andreev Arnol'd Georgievich) – канд. техн. наук, доцент кафедри «Динаміка та міцність машин» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-79, e-mail: andreev@kpi.kharkov.ua.