

УДК 622.692.4

**ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ МЕТАЛЛА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ  
СОСТОЯНИЕ**

**INFLUENCE OF HETEROGENEITY OF PHYSICOMECHANICAL  
PROPERTIES OF METAL ON THE INTENSE DEFORMED STATE**

**Гайсин А. З., Сунагатов М. Ф.**

**ООО Экспертно-производственный центр «Трубопроводсервис»,  
г. Уфа, Российская Федерация**

**A. Z. Gaisin, M. F. Sunagatov**

**Expert and Production Center LLC «Truboprovodservice»**

**Ufa, the Russian Federation**

**e-mail: aidar234@mail.ru**

**Аннотация.** В статье уделено внимание проблеме медленного докритического развития трещиноподобных дефектов, возникающих в результате воздействия механических (статических и циклических) нагрузок в трубопроводе.

Создание модели разрушения магистрального трубопровода при наличии в нем трещиноподобных дефектов, статических нагрузок, коррозионных процессов, циклических повреждений металла и динамических эффектов представляет собой весьма сложную проблему. Кроме того, практически невозможно разработать унифицированную модель, реализующую все многообразие механизмов и процессов разрушения металла, в силу особенностей работы металла в магистральных трубопроводах.

В данной работе проблема решена определением характеристики, учитывающей последствия процессов накопления повреждений и механизмов разрушения.

Цель данной работы определение фактических значений такого параметра и исследования его влияния на напряженно-деформированное состояние. В работе был выбран коэффициент линейного температурного расширения, поскольку он присутствует при определении температурных напряжений. Его фактические значения определены с помощью dilatометрического метода. Исследования влияния коэффициента линейного температурного расширения на напряженно-деформированное состояние было предложено сделать с помощью программного комплекса ANSYS. Выбор численных методов расчета обуславливается тем, что множественные расчеты возможно решить только с помощью ЭВМ, кроме того программа ANSYS выдает наглядные зависимости распределения эквивалентных напряжений от длины.

На основании полученных данных построены зависимости, определяющие влияние факторов на напряженно-деформированное состояние металла при изменении свойств материала.

В результате установлено, что температурный фактор оказывает большее влияние на напряженно-деформированное состояние при изменении коэффициента линейного температурного расширения.

**Abstract.** In article the attention to a problem of slow subcritical development the crack-like defects resulting from influence mechanical (static and cyclic) loadings in the pipeline is paid.

Creation of model of destruction of the main pipeline in the presence in it the crack-like defects, static loadings, corrosion processes, cyclic damages of metal and dynamic effects represents very complex problem. Besides, it is almost impossible to develop the unified model realizing all variety of mechanisms and processes of destruction of metal owing to features of work of metal in the main pipelines.

In this work this problem is solved by definition of the characteristic considering consequences of processes of accumulation of damages and mechanisms of destruction.

The purpose of this work determination of the actual values of such parameter and research of its influence on the intense deformed state. In work the coefficient of linear temperature expansion as it is present at determination of temperature tension was chosen. Its actual values are defined by a dilatometric method. It was offered to solve researches of influence of coefficient of linear temperature expansion on the intense deformed state by means of the program ANSYS complex. The choice of numerical methods of calculation is caused by that it is possible to solve multiple calculations only by means of the COMPUTER, besides the ANSYS program gives out evident dependences of distribution of equivalent tension on length.

On the basis of the obtained data the dependences defining influence of factors at change of properties of material are constructed, on the intense deformed condition of metal.

It is as a result established that the temperature factor has most of all impact on the intense deformed state at change of coefficient of linear temperature expansion.

**Ключевые слова:** промышленная безопасность, сварное соединение, неоднородность металла, напряженно-деформированное состояние, температурный коэффициент линейного расширения, физико-механические свойства металла.

**Key words:** industrial safety, welded connection, in homogeneity of metal, the intense deformed state, temperature coefficient of linear expansion, physic mechanical properties of metal.

Эксплуатация трубопроводов в силу их большой протяженности осуществляется в резко различающихся природно-климатических условиях. Магистральные трубопроводы с рабочим давлением 5,5-10 МПа и диаметром 1020-1420 мм являются единственными металлическими конструкциями, в которых неоднократно наблюдались хрупкие разрушения значительной протяженности, иногда достигающей нескольких километров [1]. Разрушения трубопроводов не связаны с недостаточным запасом прочности, т.е. не были вызваны превышением действующих кольцевых напряжений над расчетными. Большинство разрушений было обусловлено недостаточным сопротивлением стали труб зарождению и распространению трещин, потерей продольной устойчивости при температурных воздействиях, поперечным изломом труб при просадке грунта, коррозионными повреждениями, отклонением действительных условий нагружения от расчетных [1]. При изучении обстоятельств разрушения магистральных трубопроводов было установлено, что во многих случаях в очаге разрывов находились различные по длине риски и царапины максимальной глубиной до 1-1,5 мм. Очаги разрывов располагались в районе верхней или нижней образующей трубы (в окрестностях вертикальной плоскости симметрии), и не было отмечено случаев расположения очага в окрестностях горизонтальной плоскости симметрии труб. При этом хрупкое разрушение трубопроводов обусловлено не только свойствами металла, но и условиями нагружения, температурой эксплуатации, воздействием коррозионно-активных сред.

Проблеме медленного докритического развития трещиноподобных дефектов, возникающих в результате воздействия механических (статических и циклических) нагрузок, следует уделить особое внимание.

Становится очевидным, что создание модели разрушения магистрального трубопровода при наличии в нем трещиноподобных дефектов, статических нагрузок, коррозионных процессов, циклических

повреждений металла и динамических эффектов представляет собой весьма сложную проблему. Кроме того, практически невозможно разработать унифицированную модель, реализующую все многообразие механизмов и процессов разрушения металла, в силу особенностей работы металла в магистральных трубопроводах. Необходимо выделить механическую характеристику или характеристики, учитывающие не особенности разнообразных процессов накопления повреждений и механизмов разрушения, а их последствия. Такой характеристикой может служить зависимость вязкости разрушения (трещиностойкости) от приведенной температуры металла. При этом приведенная температура определяется как критической температурой хрупкости, так и температурой эксплуатации магистрального трубопровода.

Кроме этого теплофизическое и химико-металлургическое воздействие сварки на металл обуславливает различие механических и электрохимических характеристик зон сварного соединения (механохимическая неоднородность): зоны термического влияния, шва и основного металла.

Степень механохимической неоднородности зависит от исходных свойств металла, способа и режимов сварки, применяемых сварочных материалов и др. [2].

Механическая неоднородность свойственна практически всем сварным соединениям. В плане работоспособности в механически неоднородных соединениях обычно выделяют мягкие и твердые прослойки. Прослойки, предел текучести  $\sigma_t^m$  и временное сопротивление  $\sigma_b^m$  которых меньше, чем у металлов соседних участков, принято называть мягкими. Наоборот, у твердых прослоек металл имеет предел текучести  $\sigma_t^t$  и временное сопротивление  $\sigma_t^t$  больше, чем у соседних участков. Как правило, у твердых прослоек более низкие вязкопластические свойства [3].

Неблагоприятные структурно-химические изменения, вызванные сваркой – одна из основных причин пониженной сопротивляемости разрушению сварных соединений [4].

Основные особенности поведения сварного соединения с развитой неоднородностью свойств, при нормальной температуре, были изучены Н. О. Окербломом [5]. Им было показано, что в условиях действия внешней нагрузки перпендикулярно расположению прослоек разрушение наиболее вероятно в наименее прочной (мягкой) прослойке, при направлении же основных усилий вдоль прослоек (продольное расположение сварного шва), как правило, трещины первоначально появляются в твердой прослойке, обладающей обычно наименьшей пластичностью. Механическая неоднородность сварных соединений является следствием различий химического состава и структурного состояния отдельных участков (прослоек).

Наиболее часто мягкие прослойки образуются в зонах сплавления и термического влияния. Мягкие прослойки в одних случаях появляются в силу особенностей состава и структурного состояния стали, а в других – преднамеренно с целью обеспечения технологической и эксплуатационной прочности. Твердые прослойки могут располагаться в различных зонах сварного соединения: в металле шва, околошовной зоне и зоне термического влияния [4].

Существующие методы оценки прочности сварных соединений основаны на предположении о равномерности напряженно-деформированного состояния в соединении.

В целях определения фактических значений напряженно-деформированного состояния необходим параметр, который позволяет учесть неоднородность сварного соединения. В данной работе был выбран коэффициент линейного температурного расширения, поскольку он присутствует при определении температурных напряжений:

$$\sigma = -E \cdot \alpha T \quad (1)$$

где  $\sigma$  – температурные напряжения;

$E$  – модуль упругости;

$\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения,

$T$  – температура.

Также возникает вопрос, от каких факторов напряжения превышают допустимые значения?

В связи с тем, что исследования направлены на измерение изменения длины образца от температуры, в данной работе использовался дилатометрический метод определения коэффициента линейного температурного расширения.

Для эксперимента была использована заготовка из стали 20, сваренная ручной дуговой сваркой из двух полос листа размерами 80,0×10,0×4,0 мм. Усиление на шве было снято, а образцы были подвергнуты шлифованию и полированию. Для установления границ зоны сварного шва, зоны термического влияния и основного металла было произведено травление образцов азотной кислотой.

Из этой заготовки были вырезаны образцы размерами 8,0×1,0×0,5 мм в зонах сварного шва, термического влияния и основного металла с применением электроискрового станка с последующей обработкой шлифованием.

Измерения коэффициента линейного температурного расширения выполнялись на оптоэлектронной установке [5]. Из полученных результатов, приведенных в таблице 1 видно, что исследуемый параметр отличается не только для различных зон сварного соединения, но и в пределах одной зоны. Это приводит к тому, что в материале распределение напряжения в процессе нагружения материала происходит неравномерно, что подтверждает наличие мягких и твердых прослоек [2].

Таблица 1. Значения температурного коэффициента линейного расширения в различных зонах сварного соединения

Наименование зоны в осевом направлении	$\alpha$ , $10^{-6}$ 1/град по номеру зоны в окружном направлении				
	1	2	3	4	5
Основной металл	12,0	10,9	10,4	13,5	12,95
Зона термического влияния (ЗТВ)	11,4	12,6	12,8	11,8	13,2
Сварной шов	12,6	11,7	12,5	12,5	12,5

В целях определения зависимости различных факторов от изменения коэффициента линейного температурного расширения, было предложено решить с помощью программного комплекса ANSYS ряд задач показывающих их влияние на напряженно-деформированное состояние. Выбор численных методов расчета обуславливается тем, что множественные расчеты возможно решить только с помощью ЭВМ, кроме того программа ANSYS выдает наглядные зависимости распределения эквивалентных напряжений от длины.

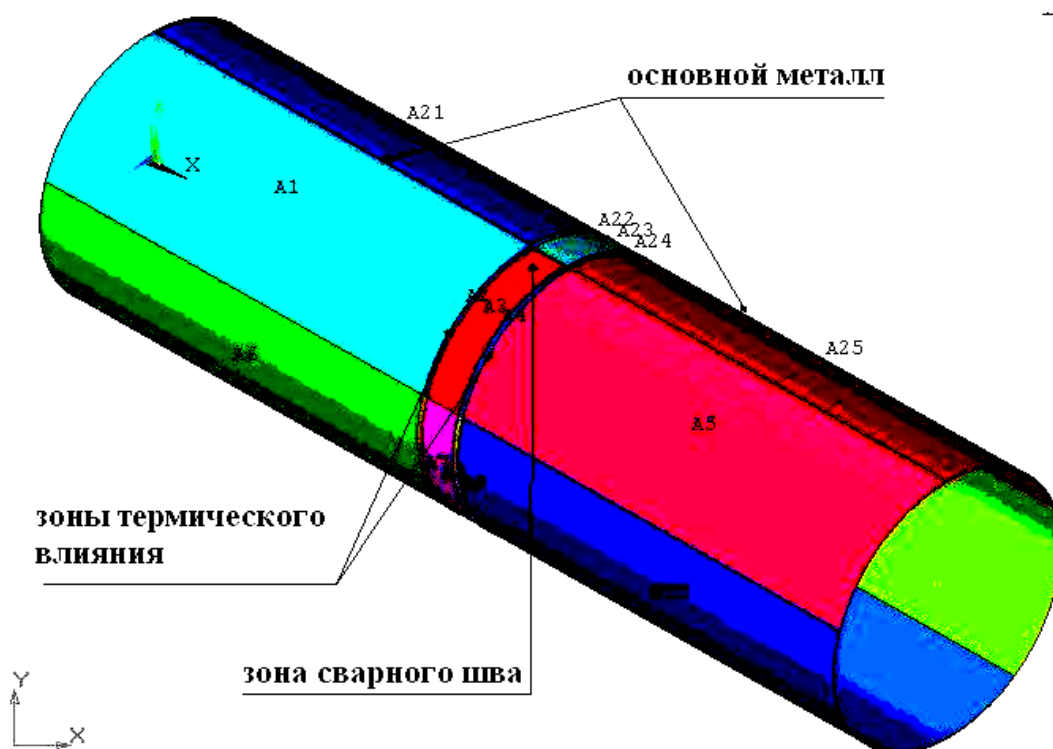


Рисунок 1. Разбивка модели на области с различными коэффициентами линейного температурного расширения



В данном программном пакете была создана модель с заданными геометрическими размерами, ее разбивка на конечные элементы, заданы свойства материала. В качестве исходных параметров для расчета использовались: коэффициенты линейного расширения, геометрические размеры образца, температура нагрева (150 °С). Образец был разбит на ряд областей по окружности трубы и по зонам сварного соединения, каждой из которой задавался свой коэффициент линейного температурного расширения (рисунок 1). Граничными условиями являлось жесткое закрепление образца (по осям X, Y).

В результате получили скачкообразное изменение эквивалентных напряжений на границах зон с различными коэффициентами линейного температурного расширения. На рисунке 2 представлен пример изменения эквивалентных напряжений по окружности образца вследствие неоднородности физико-механических свойств в одной из зон сварного соединения.

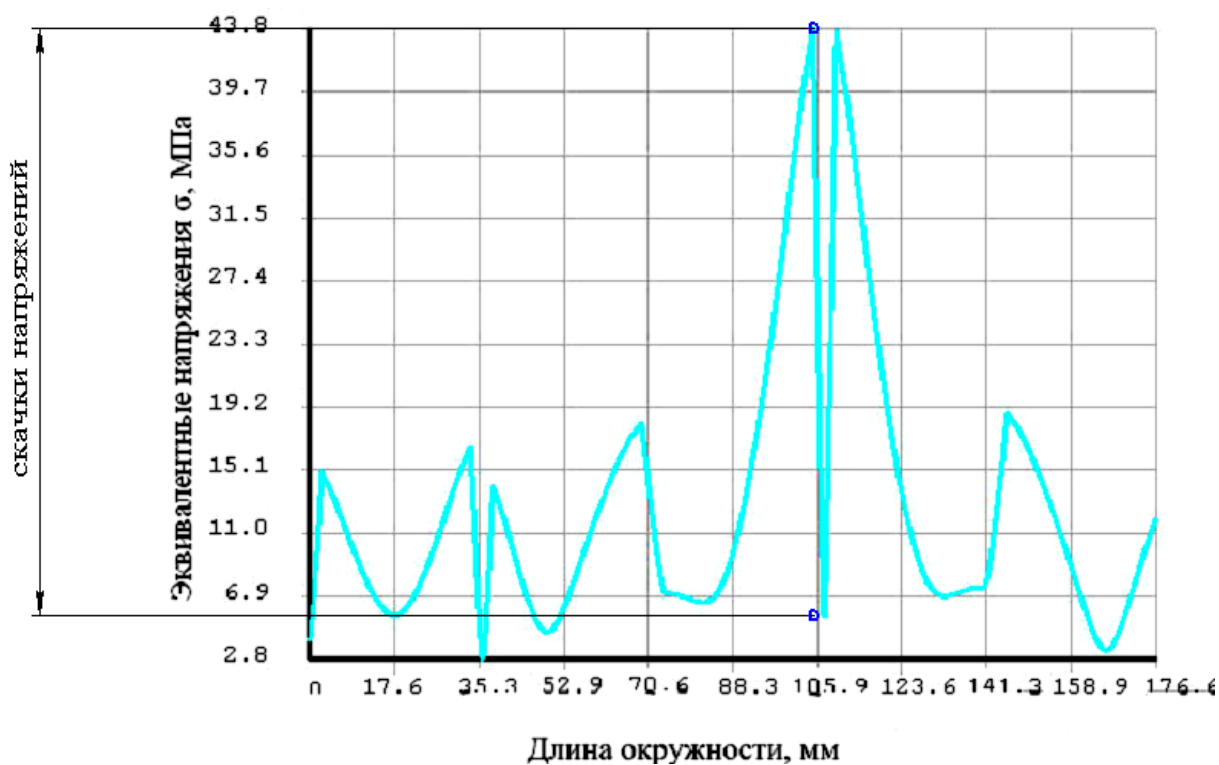


Рисунок 2. Пример полученной зависимости в ПК ANSYS

Изменяя, принятое нормативными документами, значение коэффициента линейного температурного расширения, были произведены расчеты с различной температурой, давлением и толщиной стенки. На основании полученных данных построены зависимости, определяющие влияние факторов, при изменении свойств материала, на напряженно-деформированное состояние металла.

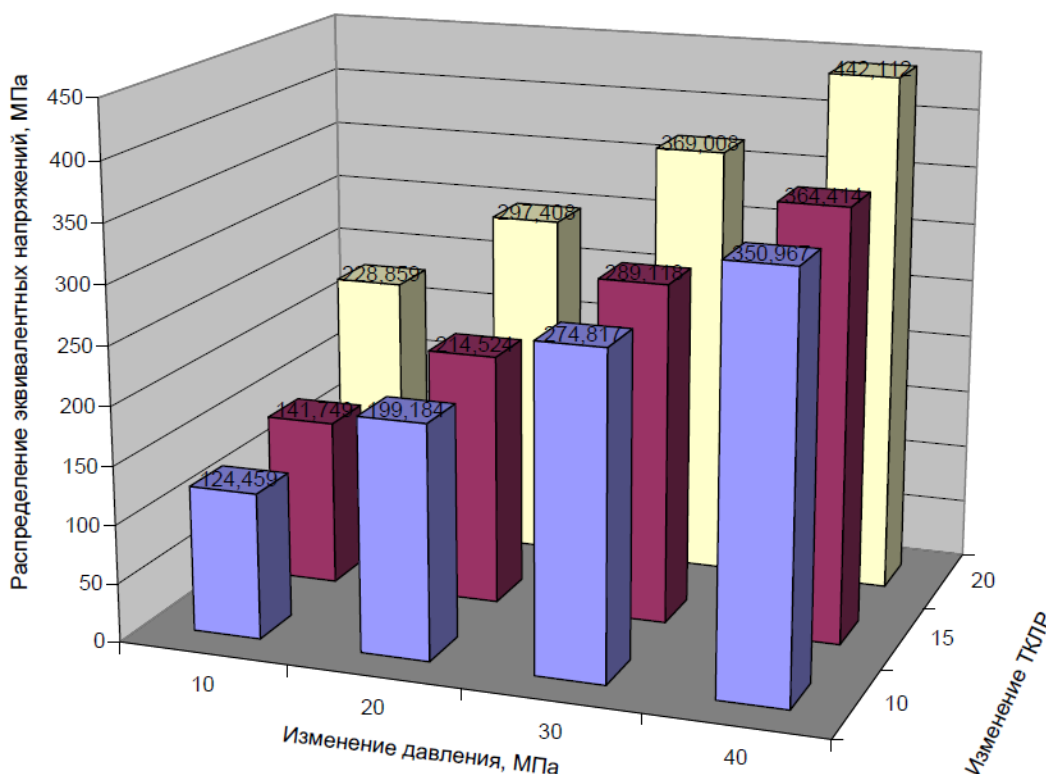


Рисунок 3. Распределение эквивалентных напряжений в зависимости от изменения давления при разных коэффициентах линейного температурного расширения (ТКЛР)

На рисунке 3 представлена зависимость изменения эквивалентных напряжений при переменных значениях давления. Установлено, что неоднородность материала не оказывает существенного влияния на эквивалентные напряжения.

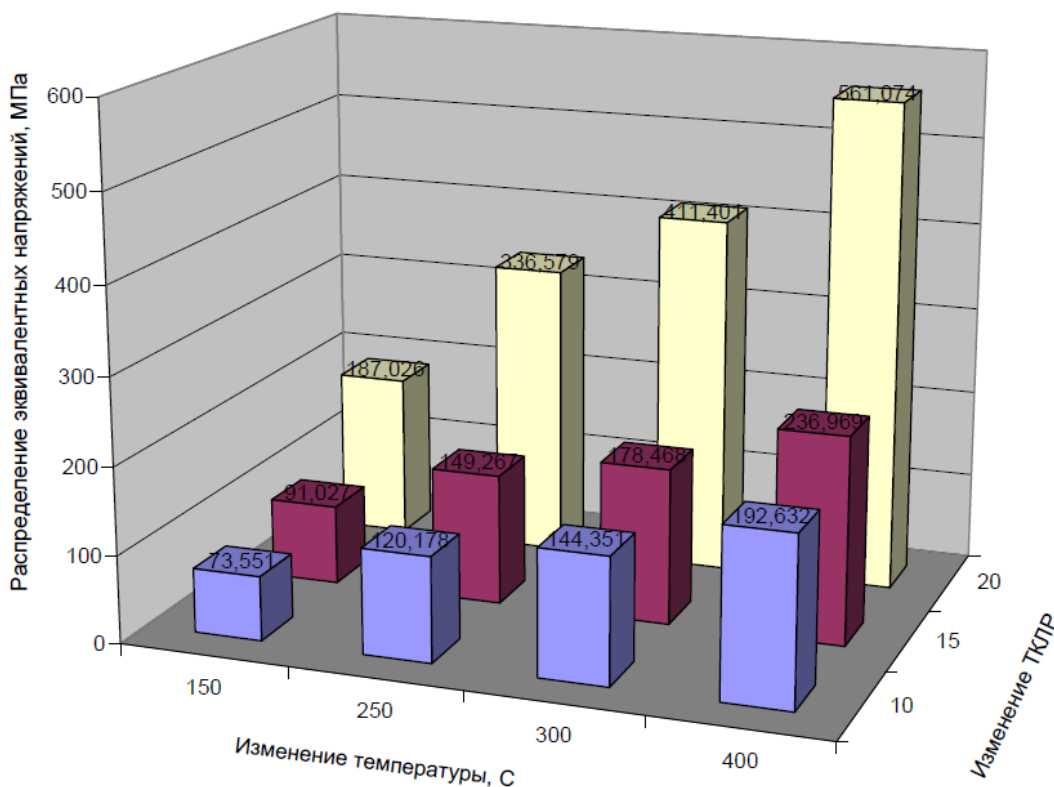


Рисунок 4. Распределение эквивалентных напряжений в зависимости от изменения температуры при разных коэффициентах линейного температурного расширения (TKLP)

На рисунке 4 в качестве переменной нагрузки был выбран температурный фактор. При значениях коэффициента температурного линейного расширения 10 и 15 эквивалентные напряжения относительно невысокие. Но при значении коэффициента - 20 произошел резкий скачок эквивалентных напряжений. Влияние неоднородности материала при переменной температуре на напряженно-деформированное состояние очень высоко.

При изменении толщины стенки трубопровода, неоднородность материала оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние, однако не в такой степени, как при переменной температуре (рисунок 5).

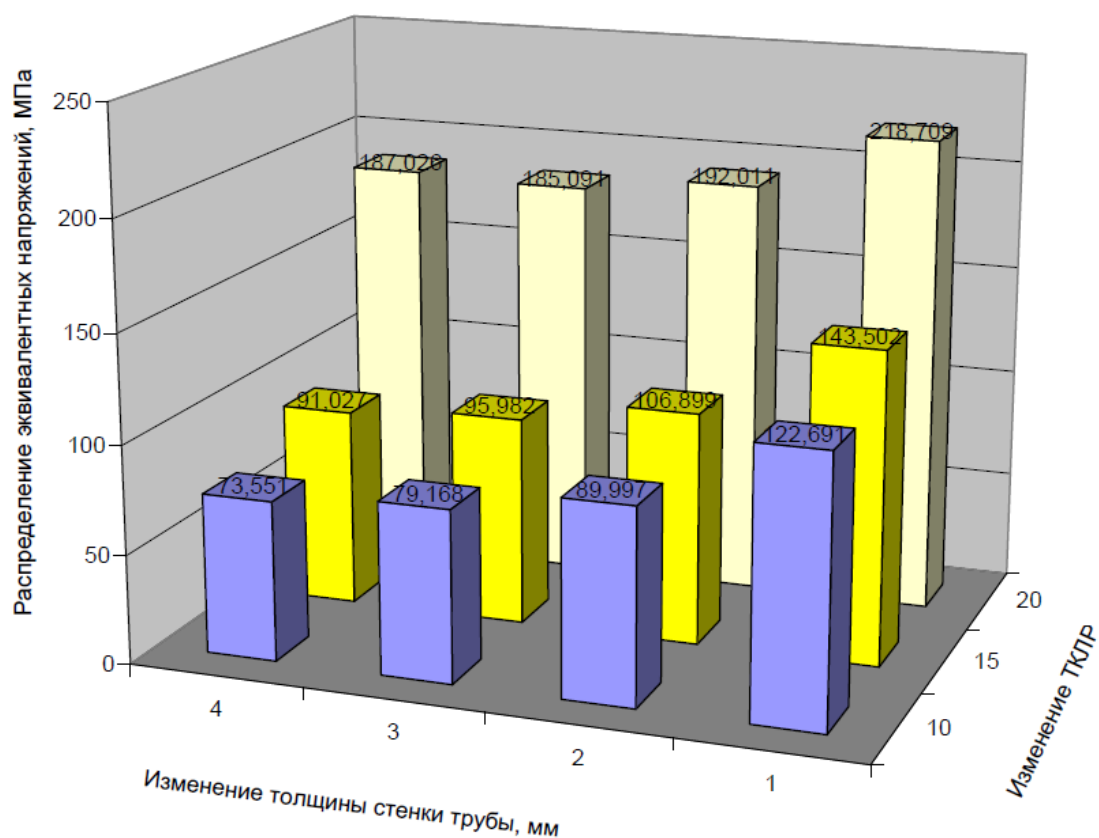


Рисунок 5. Распределение эквивалентных напряжений в зависимости от изменения толщины стенки при разных коэффициентах линейного температурного расширения (ТКЛР)

## Выводы

Таким образом, в ходе выполнения данных исследований получены следующие результаты:

1. Фактические значения температурного коэффициента линейного расширения в разных зонах сварного соединения. В ходе измерений установлено, что исследуемый параметр отличается не только для различных зон сварного соединения, но и в пределах одной зоны. Это приводит к тому, что в материале распределение напряжения в процессе нагружения происходит неравномерно, однако в существующих методиках определения эквивалентных напряжений принято считать, что этот параметр постоянен.

2. В программном комплексе ANSYS построена расчетная модель трубопровода с различными зонами сварного соединения. Неоднородность

материала задана введением различных значений температурных коэффициентов линейного расширения. В качестве нагружения были заданы различные значения температуры, давления, толщины стенки и диаметра.

3. Проведен анализ того, как на значения эквивалентных напряжений влияет неоднородность материала. В результате установлено, что неоднородность материала больше всего влияет на напряженно-деформированное состояние при изменении температуры.

### **Список используемых источников**

1 Анучкин М. П., Горицкий В. Н., Мирошниченко Б. И. Трубы для магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1986. 231 с.

2 Зайнуллин Р. С. Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости. Уфа, 1997. С. 196.

3 Зайнуллин Р. С., Халимов А. Г. Работоспособность механически неоднородных сварных соединений. Уфа: УНИ, 1989. 55 с.

4 Халимов А. Г. Обеспечение работоспособности сварного нефтехимического оборудования из хромомолибденовых сталей мартенситного класса: дис.... д-ра техн. наук. Уфа, 1997.

5 Окерблом Н. О., Демянцевич В. П. Проектирование технологии изготовления сварных конструкций. Л.: Судпромгиз, 1963. 602 с.

### **References**

1 Anuchkin M. P., Gorickij V. N., Miroshnichenko B. I. Truby dlya magistralnykh truboprovodov. M.: Nedra, 1986. 231 s. [in Russian].

2 Zajnullin R. S. Obespechenie rabotosposobnosti oborudovaniya v usloviyax mexanoximicheskoy povrezhdaemosti. Ufa. 1997. S. 196. [in Russian].

3 Zajnullin R. S., Xalimov A. G. Rabotosposobnost mexanicheski neodnorodnykh svarnykh soedinenij. Ufa: UNI, 1989. 55 s. [in Russian].

4 Xalimov A. G. Obespechenie rabotosposobnosti svarnogo nefteximicheskogo oborudovaniya iz xromolibdenovykh stalej martensitnogo klassa: Diss. d-r. texn. nauk. Ufa, 1997. [in Russian].

5 Okerblom N. O., Demyancevich V. P. Proektirovanie texnologii izgotovleniya svarnyx konstrukcij L.: Sudpromgiz, 1963. 602 s. [in Russian].

### **Сведения об авторах**

#### **About the authors**

Гайсин А.З., инженер отдела диагностики и экспертизы промышленной безопасности ООО ЭПЦ «Трубопроводсервис», г. Уфа, Российская Федерация

A. Z. Gaisin, Engineer of Department of Diagnostics and Examination of Industrial Safety of LCC Expert and Production Center «Truboprovodservice», Ufa, the Russian Federation

Сунагатов М.Ф., канд. хим. наук, генеральный директор ООО ЭПЦ «Трубопроводсервис», г. Уфа, Российская Федерация

M. F. Sunagatov, Candidate of Chemical Sciences, CEO of LCC Expert and Production Center «Truboprovodservice», Ufa, the Russian Federation

e-mail: aidar234@mail.ru