

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический
университет»

На правах рукописи

ШЕВЕЛЕВ Максим Михайлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ
БОЙКИ - ПОЛОСА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ НА
УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ**

05.02.09-Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
Лехов Олег Степанович

Екатеринбург-2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. НАГРУЖЕННОСТЬ СТЕНОК-БОЙКОВ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ	11
1.1. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали.....	12
1.2. Исследование напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации при получении листов из стали для сварных труб.....	14
1.2.1. Постановка задачи, исходные данные и граничные условия.....	14
1.2.2. Результаты расчета напряжений в очаге циклической деформации.....	17
1.3. Выводы.....	23
2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕНКАХ-БОЙКАХ БЕЗ КАНАЛОВ СБОРНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА УСТАНОВКИ ОТ УСИЛИЯ ОБЖАТИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ	24
2.1. Постановка задачи, исходные данные и граничные условия	24
2.2. Теория решения задач теории упругости методом конечных элементов в объемной постановке.....	30
2.3. Напряженное состояние стенок-бойков без каналов от воздействия усилия обжатия	32
2.4. Выводы.....	36
3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНОК-БОЙКОВ БЕЗ КАНАЛОВ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ	44
3.1. Методика расчета температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках в пакете ANSYS.....	44
3.2. Варианты расчета температурных полей стенок-бойков.....	47
3.3. Теория расчета температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках методом конечных элементов в объемной постановке	50

3.4. Теплофизические параметры материала стенок-бойков.....	53
3.5. Выбор системы коэффициентов для решения задачи о тепловой нагруженности стенок-бойков.....	54
3.6. Выводы.....	58
4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕНКАХ-БОЙКАХ БЕЗ КАНАЛОВ УСТАНОВКИ ПРИ ОБЖАТИИ ЗАГОТОВКИ И НА ХОЛОСТОМ ХОДУ	59
4.1. Постановка задачи, исходные данные и граничные условия	59
4.2. Результаты расчета температурных полей стенок-бойков без каналов (верхняя оценка).....	59
4.3. Напряженное состояние приконтактного слоя стенки-бойка без каналов от воздействия температурной нагрузки при обжати заготовки и при охлаждении водой на холостом ходу (верхняя оценка)	62
4.4. Распределение осевых термоупругих напряжений по толщине и высоте стенки-бойка при обжати заготовки и на холостом ходу при охлаждении водой	66
4.5. Распределение осевых термоупругих напряжений в приконтактном слое и по высоте стенки-бойка без каналов при обжати заготовки и на холостом ходу.....	70
4.6. Напряженное состояние стенки-бойка без каналов от воздействия усилия обжати и температурной нагрузки (верхняя оценка).....	77
4.7. Напряженное состояние стенок-бойков без каналов установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб (нижняя оценка).....	86
4.7.1. Температурное поле стенок-бойков без каналов.....	87
4.7.2. Напряженное состояние приконтактного слоя стенки-бойка без каналов от воздействия температурной нагрузки при обжати заготовки и при охлаждении водой на холостом ходу.....	87
4.7.3. Распределение термоупругих напряжений по толщине и высоте стенки-бойка без каналов при обжати заготовки и на холостом ходу	92

4.7.4. Напряженное состояние стенки-бойка без каналов от усилия обжата и температурной нагрузки (нижняя оценка).....	101
4.8. Напряженное состояние стенки-бойка без каналов установки при охлаждении его боковых поверхностей воздухом при получении листов из стали.....	109
4.8.1. Температурное поле стенок-бойков без каналов.....	109
4.8.2. Распределение термоупругих напряжений по толщине приконтактного слоя стенки-бойка без каналов при обжатии заготовки и на холостом ходу.....	112
4.8.3. Суммарное напряженное состояние стенки-бойка без каналов от усилия обжата и температурной нагрузки при охлаждении стенки бойка воздухом.....	113
4.9. Оценка напряжений в стенках-бойках различной конструкции установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб	132
4.10. Экспериментальное исследование процесса непрерывного литья и деформации на опытной установке ОАО «Уральский трубный завод»	136
4.11. Выводы.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ А - Акт внедрения научно-исследовательской работы.....	152

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

За рубежом ведутся работы по созданию высокоэффективных технологий и оборудования для производства широких стальных листов на основе валковых литейно-прокатных агрегатов [1-3]. При этом важными задачами являются уменьшение расхода энергии и удельных капиталовложений. Для получения листов для сварных труб разработана технология совмещенного процесса непрерывного литья и прокатки, при которой выходящий из кристаллизатора установки непрерывного литья тонкий сляб с жидкой сердцевиной обжимается двумя парами валков зоны вторичного охлаждения до заданной толщины, что позволяет сократить количество клетей для последующей прокатки. Однако валковые агрегаты имеют низкую производительность, степень деформации полосы не превышает 10-15 %, что не обеспечивает получения высоких механических свойств стальных листов [4-9].

Для решения изложенных выше проблем производства стальных листов для сварных труб целесообразно использовать компактную установку совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, технологические возможности которой предусматривают отливку тонких слябов и их обжатие с высокой степенью деформации за проход и в узком температурном интервале, что позволит существенно снизить энергозатраты и улучшить качество листов из стали для сварных труб [10-42].

Основной проблемой, возникающей при обжатии непрерывнолитых слябов, является обеспечение благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, получении однородной и мелкозернистой структуры металла, исключение ликвационных зон в осевой зоне листов и получение высоких механических свойств стальных листов для сварных труб [31-32]. В результате интенсификации производства стальных листов для сварных труб и

повышения требований, предъявляемых к механическим свойствам и состоянию поверхности стальных листов, значительно возрастает нагруженность стенок-бойков установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации и требования к качеству их поверхности. Условия эксплуатации стенок-бойков установки выдвинули ряд существенных требований по обеспечению их стойкости. Таким образом актуальной задачей является обоснованный выбор конструктивных параметров и материала стенок-бойков, обеспечивающих не только износостойкие свойства, но и способность противостоять циклическим нагрузкам при воздействии термоупругих и механических напряжений.

Степень разработанности проблемы

При разработке конструкции и выборе материала стенки-бойка важно учитывать нагруженность и реальные условия эксплуатации стенок-бойков установки, чтобы увеличить ресурс их работы и обеспечить повышение качества поверхности и точность размеров листов из стали для сварных труб. В связи с этим очень важно определить напряженно-деформированное состояние непрерывнолитого металла в очаге циклической деформации, что позволит оценить нагруженность стенок-бойков. При этом также целесообразно определить напряженное состояние стенок-бойков установки от температурной нагрузки и усилия обжатия при получении листов для сварных труб. Это позволит более обоснованно выбирать конструктивные параметры и материал стенок-бойков установки с целью повышения их стойкости и улучшения качества листов из стали для сварных труб.

В работах [24,26] даны результаты расчета температурного поля и термоупругого напряженного состояния стенок-бойков сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с учетом каналов для охлаждения стенок-бойков при получении листов из стали для сварных труб. Установлено, что каналы в стенках-бойках являются концентраторами напряжений, приводящие к существенному увеличению напряжений в стенках-бойках как от усилий обжатия, так и от

температурной нагрузки. В связи с этим выполнен расчет напряженного состояния стенок-бойков без каналов для их охлаждения.

Цель диссертационного исследования: с использованием современных методов решения задач упруго-пластичности определить нагруженность и напряженно-деформированное состояние системы бойки-полоса при получении листов из стали на установке непрерывного литья и деформации и на основе этого разработать научно-обоснованные рекомендации по выбору конструктивных параметров и материала стенок-бойков и режимов циклической деформации, направленные на повышение стойкости стенок-бойков и улучшение качества листов из стали для сварных труб.

Задачи диссертационного исследования:

- определить напряженно-деформированное состояние металла в очаге циклической деформации при получении листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм из стали 09Г2С на установке непрерывного литья и деформации;

- по результатам моделирования определить закономерности распределения осевых, касательных и эквивалентных по Мизесу напряжений в очаге циклической деформации затвердевшего металла;

- разработать алгоритмы расчета осевых напряжений от усилия обжатия, температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов сборного кристаллизатора установки при получении листов из стали для сварных труб;

- по результатам моделирования установить закономерности распределения в стенках-бойках без каналов температуры, напряжений от усилия обжатия, термоупругих, эквивалентных и суммарных напряжений;

- провести экспериментальные исследования совмещенного процесса непрерывного литья и деформации на опытной установке.

Методология и методы исследования

Методы МКЭ-моделирования напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации и стенок-бойков сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации в программном комплексе ANSYS.

Научную новизну и теоретическую ценность представляют следующие разработки диссертации:

- установлены закономерности распределения осевых и эквивалентных по Мизесу напряжений при циклической деформации затвердевшего металла с учетом силы вытягивания сляба с жидкой фазой из неразъемного кристаллизатора при получении листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм из стали 09Г2С для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации;

-разработан алгоритм расчета температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов сборного кристаллизатора установки . Алгоритм позволил установить закономерности распределения температуры , осевых термоупругих и эквивалентных по Мизесу напряжений в стенках-бойках без каналов при обжатии заготовки и на холостом ходу;

-установлены закономерности распределения осевых напряжений и эквивалентных по Мизесу напряжений в стенках-бойках без каналов сборного кристаллизатора от усилия обжатия при получении листов из стали для сварных труб на установке;

-определено суммарное поле напряжений в стенках-бойках без каналов сборного кристаллизатора установки от температурной нагрузки и усилия обжатия заготовки

Практическую значимость диссертации составляют:

- результаты моделирования в программном комплексе ANSYS позволили оценить схему напряженного состояния металла в очаге циклической деформации при получении листов из стали и определить

нагруженность стенок-бойков и оборудования установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации;

- результаты расчета температурных полей и суммарных напряжений в стенках-бойках без каналов сборного кристаллизатора установки позволили разработать рекомендации по выбору конструктивных параметров и материала стенок-бойков;

- результаты экспериментального исследования совмещенного процесса на опытной установке непрерывного литья и деформации.

Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали толщиной 3-22 мм и шириной до 2150 мм для сварных труб принята к внедрению на ОАО «Уральский трубный завод».

На защиту выносятся:

- постановка задачи и результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации с учетом силы вытягивания сляба из неразъемного кристаллизатора при получении листов из стали для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации;

- постановка задачи и результаты расчета напряженного состояния стенок-бойков без каналов сборного кристаллизатора от усилия обжатия заготовки при получении листов из стали для сварных труб;

- алгоритм и результаты расчета температурных полей, термоупругих и суммарных напряжений в стенках-бойках без каналов сборного кристаллизатора установки при получении листов из стали для сварных труб.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается применением современных методов расчета напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации, напряженного состояния стенок- бойков от усилия обжатия и температурной нагрузки, а также результатами исследования на опытной установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: I Международная научно-практическая конференция «Инновации в образовании, науке и промышленности» (г. Пермь, 2016); X Международная научно-техническая конференция «Проблемы исследования и проектирования машин» (г. Пенза, 2016); XXI Международная научно-техническая конференция «Приоритетные направления развития науки и технологий» (г. Тула, 2017); X Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2017); XI Международный конгресс прокатчиков (г. Магнитогорск, 2017).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в монографии и в 12 печатных трудах, в том числе в 8 рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и изложена на 152 страницах машинописного текста, включая 80 рисунков, 21 таблицу и библиографический список из 69 наименований.

1 НАГРУЖЕННОСТЬ СТЕНОК-БОЙКОВ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ

Современная технология толстолистовой прокатки при обжатии крупных непрерывнолитых слябов характеризуется значительной неравномерностью деформации по высоте сляба, что приводит к формированию неоднородной структуры толстолистового проката [31]. В связи с этим актуальной задачей является повышение степени однородности деформации в объеме непрерывнолитого сляба и формирование однородной мелкозернистой структуры толстолистового проката для сварных труб. Для этой цели необходимо увеличивать обжатия за проход, что практически невозможно осуществить, поскольку степень деформации за проход при толстолистовой прокатке составляет 10-15%. В результате в осевой зоне сляба литая структура недостаточно прорабатывается, неметаллические включения и ликваты имеют строчечное расположение в металле вдоль оси прокатки, что снижает прочностные характеристики металла проката и сварного шва при производстве сварных труб. За рубежом разработана разливка тонких слябов, при которой сочетается разливка и обжатие заготовки с жидкой фазой несколькими парами роликов зоны вторичного охлаждения [1, 2]. Установлено, что в случае разливки тонких слябов имеет место более мелкозернистая структура металла и меньшая область ликвации в осевой зоне сляба, чем при разливке стандартных слябов толщиной 200-250 мм.

Таким образом, для улучшения качества листов из стали для сварных труб следует разработать технологию, включающую разливку тонких слябов и их обжатие с высокой степенью деформации за проход и в узком температурном интервале. Эту новую технологию производства листов из стали для сварных труб возможно реализовать на компактной установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [10-30].

Стенки-бойки установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб циклически воспринимают усилия обжатия и одновременно температурную нагрузку. Поэтому необходимо оценить нагруженность оборудования установки непрерывного литья и деформации, что позволит определить закономерности распределения напряжений в стенках-бойках от усилия обжатия и влияния на них технологических параметров совмещенного процесса непрерывного литья и деформации и разработать рекомендации для их снижения.

1.1. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

На рисунке 1.1 представлена схема установки непрерывного литья и деформации [10,11,13], которая состоит из неразъемного медного кристаллизатора 1 и двух суппортов 2 со стенками-бойками 4 сборного кристаллизатора. Боковые стенки сборного кристаллизатора крепятся к кристаллизатору 1. Рабочие поверхности боковых стенок в совокупности со стенками-стенками-бойками 4 образуют сборный кристаллизатор, полость которого является продолжением полости кристаллизатора 1. Кристаллизатор 1 по своей нижней торцевой поверхности имеет постоянный контакт с подвижными стенками-бойками 4, причем он прижимается к стенкам-бойкам с помощью специального пружинного механизма.

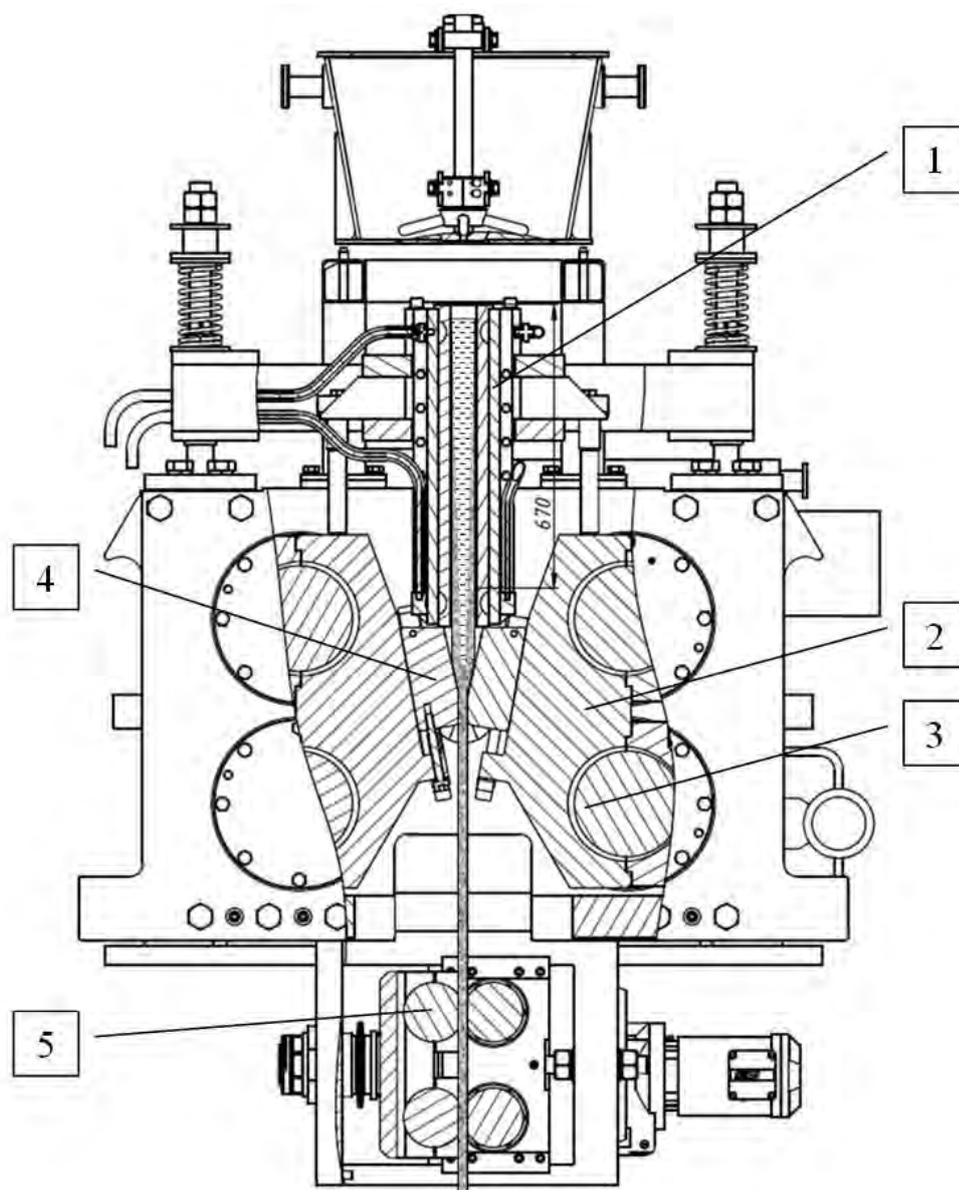


Рисунок 1.1 – Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

Стенки-бойки имеют специальные каналы для подвода смазки или воды для сбивания окалины. Каждый суппорт со стенками-стенками-бойками установлен на двух эксцентриковых валах 3. Синхронное вращение эксцентриковых валов осуществляется от приводного электродвигателя. Вытягивание заготовки из кристаллизатора 1 осуществляется с помощью стенок-бойков во время ее обжатия и тянущих роликов 5 во время холостого хода.

Совмещенный процесс непрерывного литья и деформации может быть разбит на 4 стадии, которые осуществляются одновременно:

- кристаллизация расплава металла в неразъемном кристаллизаторе 1 с образованием затвердевшей оболочки с жидкой фазой и последующее вытягивание ее из кристаллизатора стенками--бойками 4 и тянущими роликами 5 ;
- формирование стенками-стенками-бойками 4 полосы из оболочки с жидкой фазой путем сближения ее широких стенок и гибки боковых стенок ;
- циклическая деформация стенками-стенками-бойками 4 затвердевшего металла ;
- калибровка полосы с целью обеспечения заданной точности размеров листа .

1.2. Исследование напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации при получении листов из стали.

1.2.1. Постановка задачи, исходные данные и граничные условия.

Рассмотрим процесс получения листа сечением 3×2250 мм из стали 09Г2С. Толщина полосы после смыкания широких стенок оболочки с жидкой фазой равна 30 мм, то есть обжимается тонкий сляб. Степень деформации полосы за проход при получении листа толщиной 3 мм составляет 90 %. На внешней поверхности очага деформации принимаем температуру равную 1200 °С, а на внутренней поверхности оболочки - 1450 °С. Таким образом осуществляется обжатие тонкого сляба с высокой степенью деформации за один проход и в узком температурном интервале, что гарантирует получение листов высокого качества для сварных труб.

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов [43-49]. Конкретно: использована плоская

постановка контактной задачи упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений. Для решения задачи была использована программа ANSYS [43]. Величина эксцентриситета эксцентриковых валов равна 5 мм, а их угловая скорость 110 мин⁻¹. Угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка 12,5 градусов. Как и при исследовании оболочки с жидкой фазой, материал исследования - сталь 09Г2С. Ферростатическое давление для оболочки с жидкой фазой принято равным 0,066 МПа, а коэффициент трения между стенкой-бойком и полосой составил 0,5. Коэффициент трения между медной стенкой неразъемного кристаллизатора и стальной оболочкой с жидкой фазой принят равным 0,5. Для стенки бойка модуль упругости принят равным 210 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,3.

Общая модель для расчета дана на рисунке 1.2. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния затвердевшего металла в плоской постановке с учетом силы вытягивания оболочки с жидкой фазой из неразъемного кристаллизатора для листа толщиной 3 мм.

Для расчета напряженно-деформированного состояния очага деформации необходимо определить положение заготовки, неразъемного кристаллизатора и стенок-бойков друг относительно друга. На рисунке 1.2 показаны положение заготовки, кристаллизатора и стенки-бойка для обеспечения выхода полосы толщиной 3 мм перед началом рабочего хода.

Рабочая длина неразъемного кристаллизатора, где происходит кристаллизация металла расплава $l_0=625$ мм, длина геометрического очага деформации $l_g=60,9$ мм. Длина наклонной части стенок-бойков сборного кристаллизатора $l_2=220$ мм, а калибрующего участка $l_k=60$ мм.

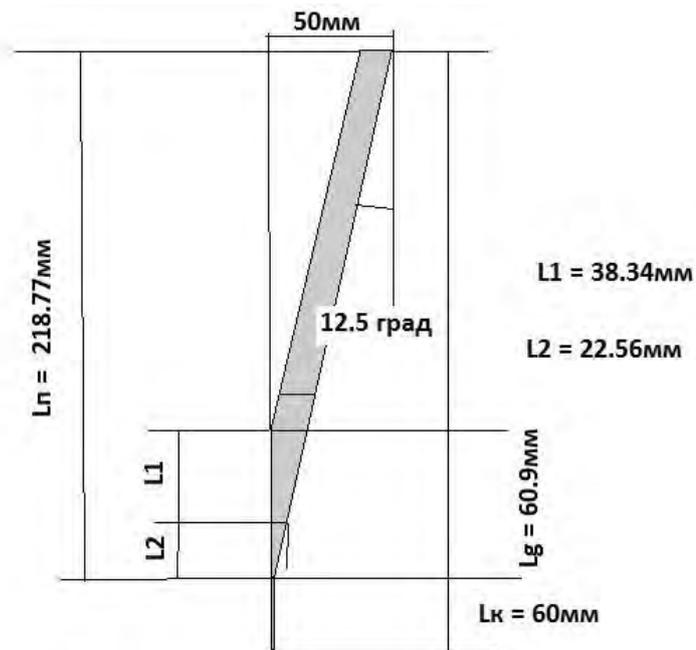


Рисунок 1.2 - Положение заготовки и бойка перед началом рабочего хода для обеспечения выхода полосы толщиной 3мм

На рисунке 1.3 дано положение очага деформации наклонного и калибрующего участка бойка перед началом рабочего хода. Здесь же показано положение точек, необходимых для наглядного представления результатов расчета.



Рисунок 1.3 - Положение очага деформации, наклонного и калибрующего участка бойка перед началом рабочего хода

1.2.2 Результаты расчета напряжений в очаге циклической деформации

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации затвердевшего металла представлены в виде эюр перемещений, напряжений и деформаций. На рис. 1.4-1.9 представлены эюры распределения осевых, касательных и контактных напряжений при получении листов толщиной 3 мм из стали 09Г2С.

Приведем выборочные результаты по максимальным напряжениям по поверхности контакта очага деформации со стенкой-бойком и в области симметрии очага деформации. Так, сжимающие напряжения σ_x в зоне контакта очага деформации со стенкой-бойком достигают 326 МПа.



Рисунок 1.4 – Характер напряжений по оси ОХ на оси симметрии. Положение точек смотри на рисунке 1.3. Толщина полосы на выходе – 3мм

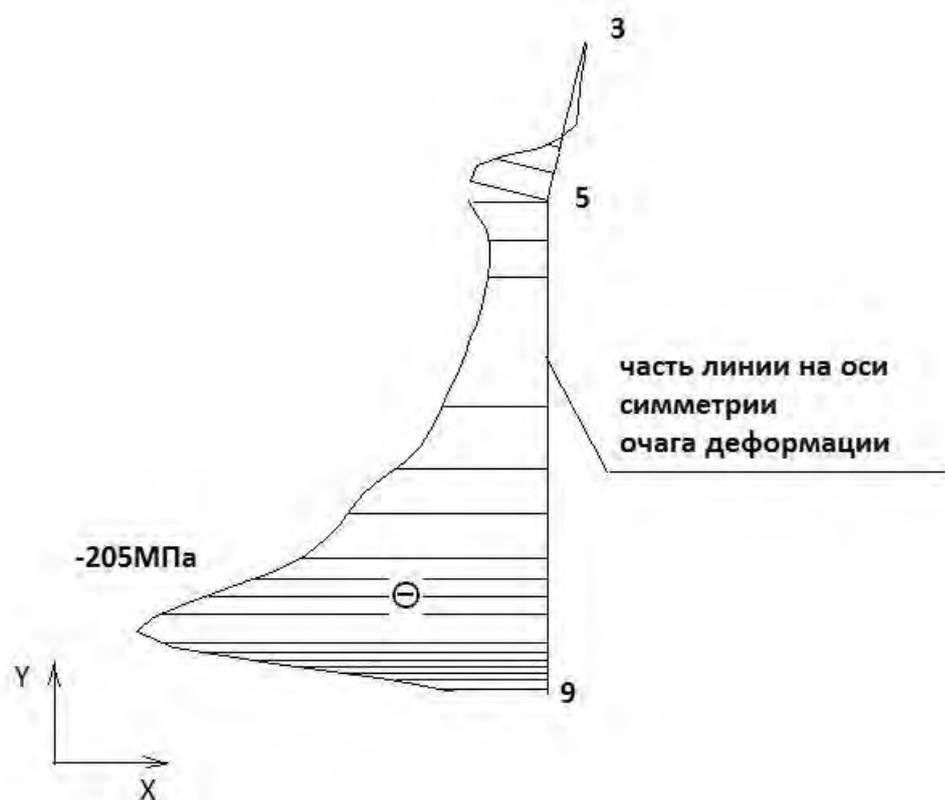


Рисунок 1.5 – Характер напряжений по оси OY на оси симметрии. Положение точек смотри на рисунке 1.3. Толщина полосы на выходе – 3мм

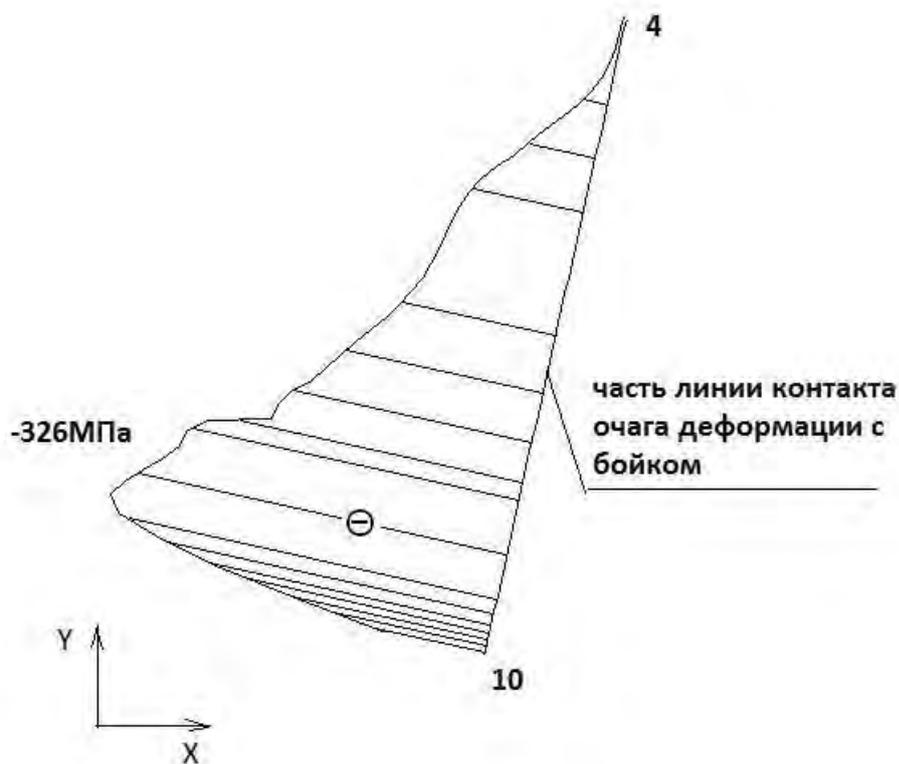


Рисунок 1.6 – Характер напряжений по оси OX на части линии контакта очага деформации с бойком. Толщина полосы на выходе – 3мм

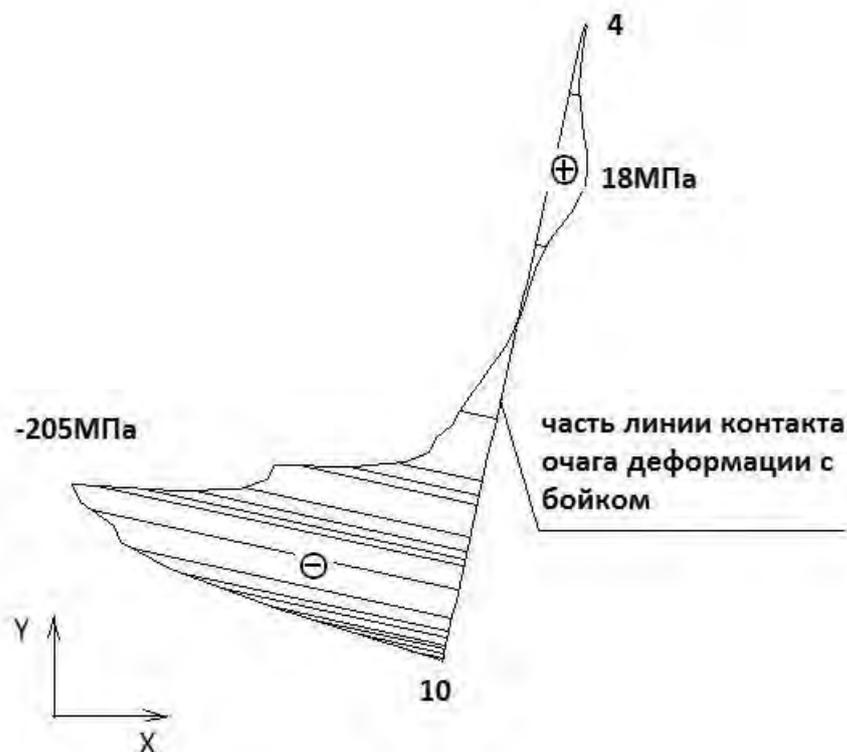


Рисунок 1.7– Характер напряжений по оси ОУ на части линии контакта очага деформации с бойком. Толщина полосы на выходе – 3мм

Полученные результаты свидетельствуют о благоприятной с позиции получения листов из стали высокого качества схемы напряженного состояния в очаге циклической деформации с преобладанием высоких (до минус 326 МПа) сжимающих напряжений. Такая схема напряженного состояния способствует достаточной проработке литой структуры по всей толщине тонкого сляба и получению мелкозернистой однородной структуры металла листов из стали для сварных труб.

На рисунке 1.8 приведены закономерности распределения касательных напряжений на линии контакта с очагом деформации со стенкой-бойком, причем их величина достигает 53 МПа, а на рисунке 1.9 показан характер контактных напряжений на части линии контакта очага деформации со стенкой-бойком.

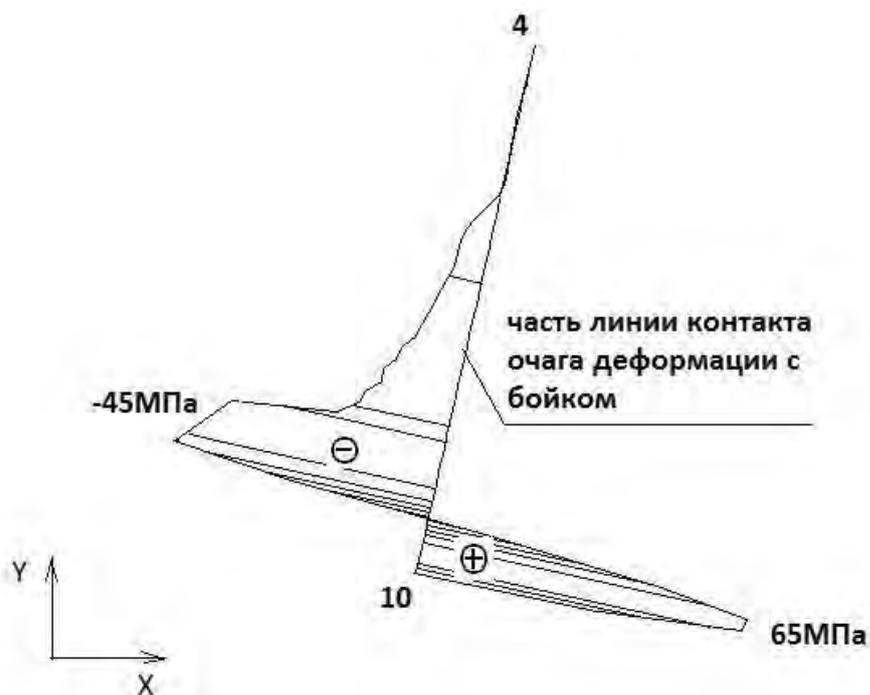


Рисунок 1.8 – Характер касательных напряжений на части линии контакта очага деформации с бойком. Толщина полосы на выходе – 3мм

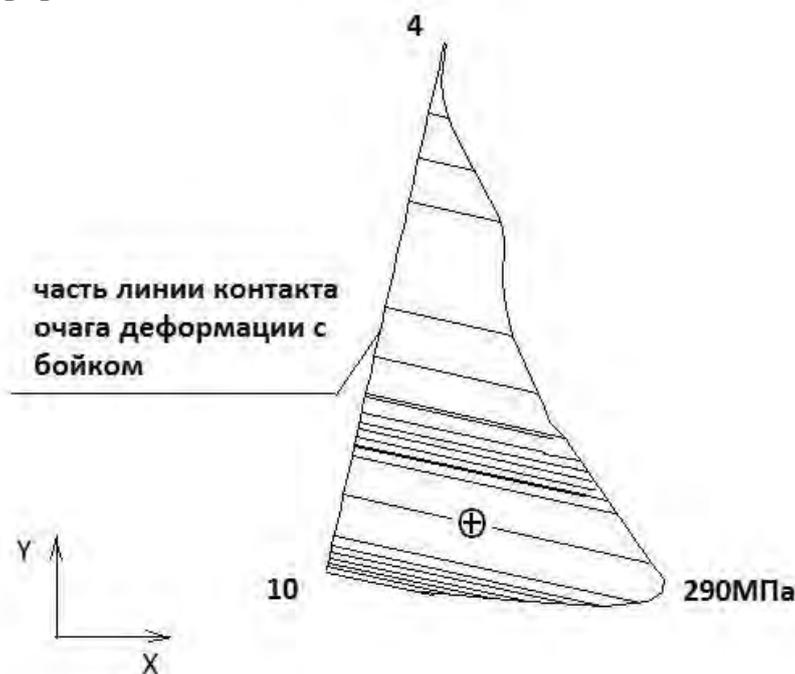


Рисунок 1.9 – Характер контактных напряжений на части линии контакта очага деформации с бойком. Толщина полосы на выходе – 3мм

В таблице 1.1 приведены значения напряжений и усилия деформации при получении листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм из стали 09Г2С.

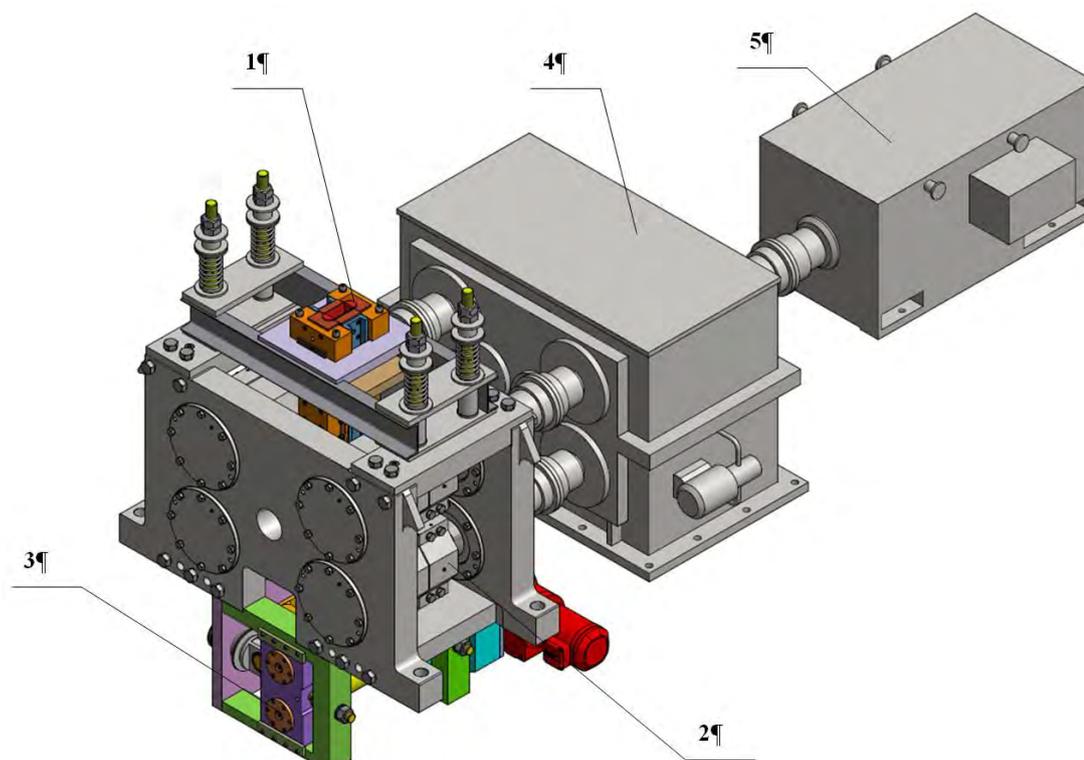
Таблица 1.1 - Значение напряжений и усилия деформаций при получении листов из стали 09Г2С

Толщина получаемого листа, мм	3	
Максимальное напряжение по оси ОХ, МПа	по линии 3-9	- 323
	по линии 4-10	-326
Максимальное напряжение по оси ОУ, МПа	по линии 3-9	-205
	по линии 4-10	-205
Горизонтальное усилие на стенку-боек, кН	24300	
Вертикальное усилие на стенку-боек, кН	220	

Полученные результаты свидетельствуют о том, что схема напряженного состояния металла в очаге деформации с преобладанием высоких сжимающих напряжений (до минус 326 МПа) благоприятна для получения листов из стали высокого качества. Высокие сжимающие напряжения имеют место и в осевой зоне заготовки. Такая схема напряженного состояния способствует достаточной проработке литой структуры металла по всей толщине сляба и получению мелкозернистой однородной структуры металла листов из стали для сварных труб.

Предлагаемая технология совмещенного процесса непрерывного литья и деформации исключает продольную разнотолщинность листа вследствие узкого температурного интервала деформации, поскольку получение листа из тонкого сляба осуществляется за один проход.

На рисунке 1.10 представлена опытная установка для получения полос толщиной $3\div 22$ мм и шириной 220 мм из стали для сварных труб, которая установлена на ОАО «Уральский трубный завод».



1- водоохлаждаемый медный кристаллизатор; 2 – суппорт со стенкой-бойком; 3 – тянущее устройство; 4 – редуктор-синхронизатор; 5 – приводной электродвигатель

Рисунок 1.10 – Опытная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб

Сечение рабочей полости медного водоохлаждаемого кристаллизатора 60×180 мм, высота – 800 мм. Максимальное усилие деформирования – 2000 МПа. Угловая скорость вращения эксцентриковых валов – 110 мин^{-1} . Скорость вытягивания слитка из кристаллизатора – 2,5 м/мин. Мощность приводного электродвигателя - 200 кВт.

Следует отметить, что при выполнении проекта опытной установки все основные ее параметры, кроме ширины полости медного кристаллизатора, стенок-бойков и роликов тянущего устройства, угловая скорость эксцентриковых валов, скорость вытягивания сляба из кристаллизатора и параметры очагов деформации приняты как для промышленной установки непрерывного литья и деформации для производства листов толщиной $3 \div 22$ мм и шириной до 2250 мм из стали для сварных труб с производительностью 80 т/ч.

1.3. Выводы

1. В результате решения задачи определения напряженно-деформированного металла в очаге циклической деформации определена нагруженность оборудования установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, которая имеет место при получении листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм из стали 09Г2С.

2. Установлено, что в очаге циклической деформации возникают высокие осевые сжимающие напряжения (до минус 326 МПа) как на контактной поверхности, так и в осевой зоне тонкого сляба, что свидетельствует о достаточной проработке литой структуры металла и способствует улучшению качества листов из стали для сварных труб.

3. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации позволяет отливать с использованием механического перемешивания расплава тонкие слябы, обжимать их в узком температурном интервале и с высокой степенью деформации за проход при наличии сжимающих напряжений в очаге циклической деформации, что позволяет получать стальные листы с однородной и мелкозернистой структурой металла, без осевых ликвационных зон и продольной разнотолщинности, с заданной точностью и хорошей поверхностью.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕНКАХ-БОЙКАХ БЕЗ КАНАЛОВ СБОРНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА УСТАНОВКИ ОТ УСИЛИЯ ОБЖАТИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ

Стенки-бойки сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при обжатии листов из стали циклически воспринимают усилия обжатия и одновременно температурную нагрузку. Поэтому на первом этапе расчета необходимо определить величины и закономерности распределения напряжений в стенках–бойках от усилия обжатия и влияния на них технологических параметров совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Это позволит разработать рекомендации для снижения уровня напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора и тем самым повысить их стойкость. Напряжения в стенках-бойках определяется одновременно при исследовании напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении листов из стали для сварных труб. [24,26,50-53]

2.1 Постановка задачи, исходные данные и граничные условия

Расчет производился при максимальном усилии, которое возникает при получении листов сечением 3×2250 мм из стали 09Г2С на установке непрерывного литья и деформации. Материал стенки-бойка – сталь 45ХНМ. Теплофизические свойства данной стали приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Принятые для расчета значения модуля упругости E , плотности ρ , теплопроводности λ , теплоемкости C , коэффициента линейного расширения α и предела текучести σ_T для стали 45ХНМ в интервале температур от 20°C до 700°C / 45, 60/

Параметр	Температура, °C							
	20	100	200	300	400	500	600	700
$E \times 10^{-5}$, МПа	2.16	2.07	1.97	1.88	1.76	1.68	1.52	1.36
$\rho \times 10^6$, кг/мм ³	7.75	7.73	7.72	7.69	7.69	7.66	7.62	7.60
$\lambda \times 10^3$, Вт/(мм·град)	34	34	33	32	41	30	29	27
C , Дж/(кг·град)	480	480	500	520	540	555	556	556
$\alpha \times 10^6$, 1/град	11.6	12.6	12.1	12.7	13.2	13.6	13.9	14.0
σ_T , МПа	440...590	-	-	-	360	-	-	-

Геометрия стенки-бойка для расчета его напряженного состояния дана на рисунке 2.1.

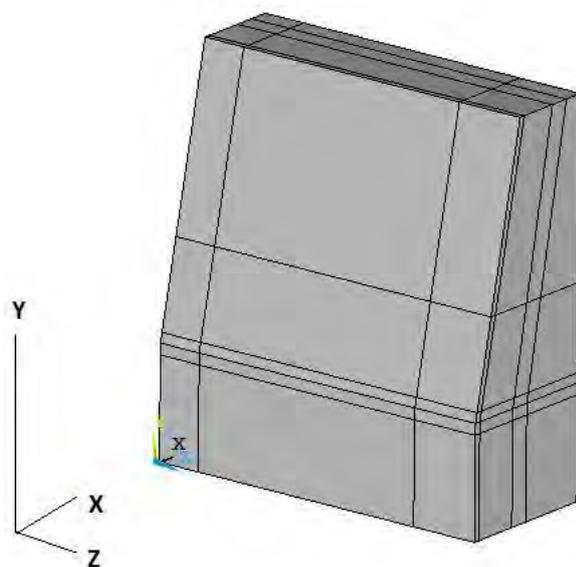


Рисунок 2.1 – Геометрия стенки-бойка без каналов, принятая для расчета

Толщина стенки-бойка по верхней поверхности – 70 мм. Длина стенки-бойка – 570 мм. Угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка – 12.5 градусов. Для расчета в силу симметрии принята половина стенки-бойка. При принятых размерах стенки-бойка предел текучести стали 45ХНМ в

зависимости от режима термообработки находится в диапазоне 440-590 МПа, а предел прочности – 635-735 МПа.

Характер нагружения стенки-бойка дан на рисунке 2.2.

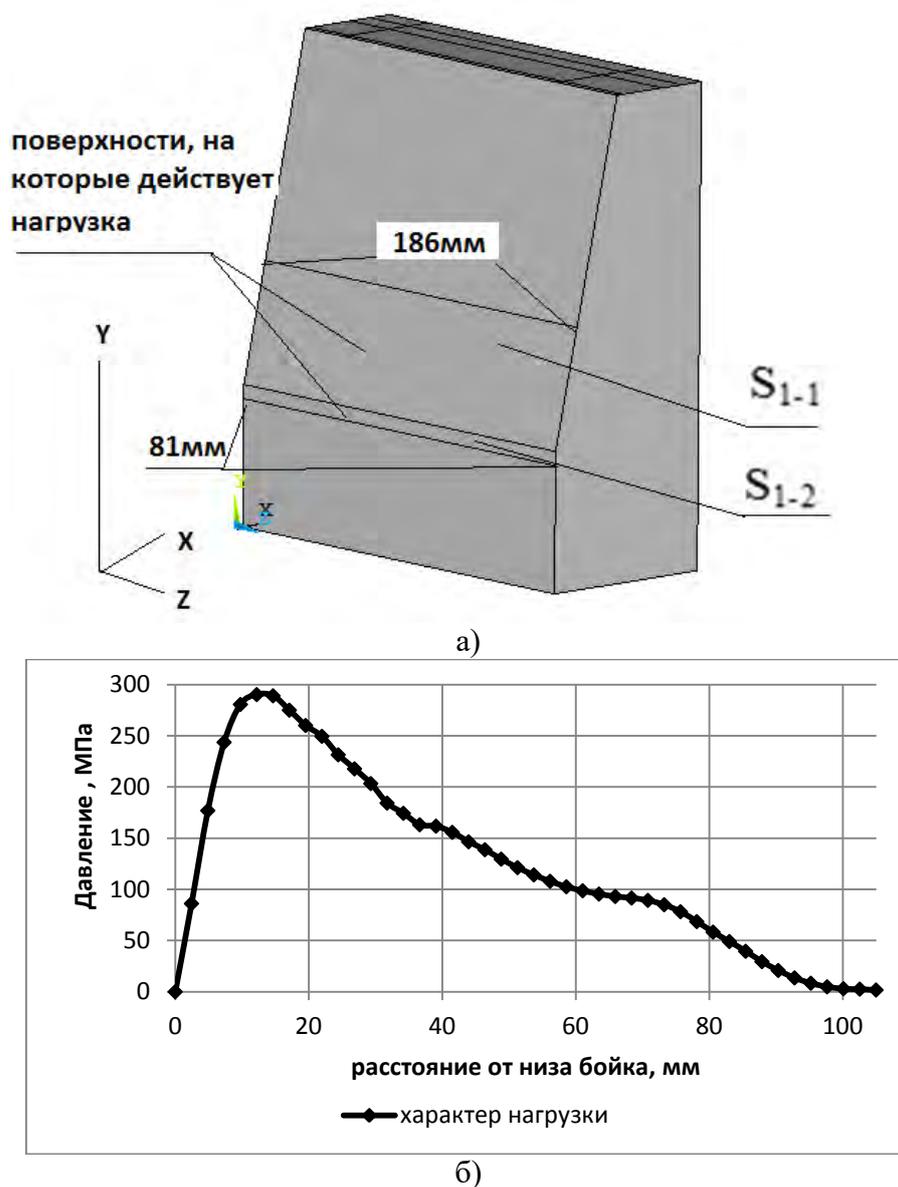


Рисунок 2.2 – Модель для расчета и характер нагружения стенки-бойка

Характер нагрузки дан на рисунке 2.2б, причем «0» на горизонтальной оси соответствует точке $Y=81$ мм стенки-бойка. Из рисунка следует, что наибольшее удельное давление имеет место в конце обжатия полосы. Нагрузка – это статические граничные условия. Кроме нагрузки заданы кинематические граничные условия:

- на плоскости ХУ (рисунок 2.1) задано отсутствие перемещений в направлении оси Z, что обусловлено симметрией расчетной модели;

- на задней поверхности стенки-бойка, контактирующей с суппортом, задано отсутствие перемещений по всем направлениям.

Расчет выполнялся для нагрузки на стенку-боек в конце рабочего хода. Результаты напряженного состояния стенки-бойка приведены в 5-ти сечениях показанных на рисунке 2.3.

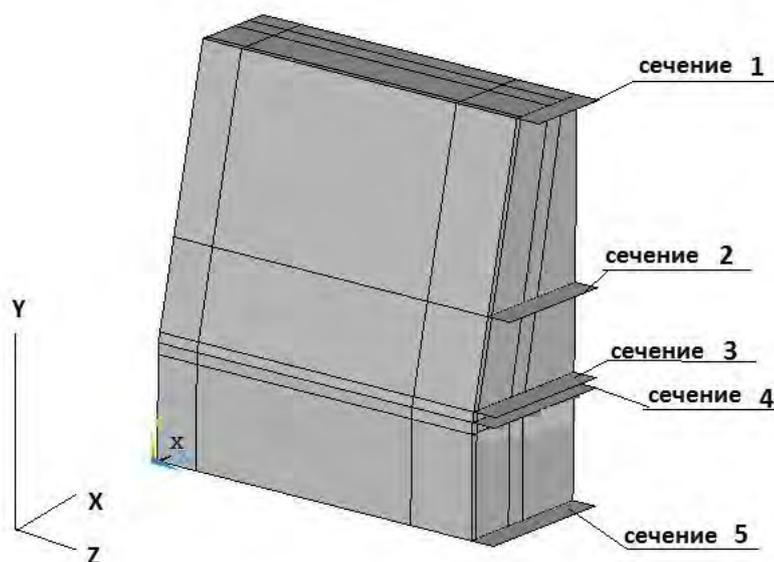


Рисунок 2.3 – Положение сечений, где приведены результаты расчета

При этом в каждом сечении температуры и термоупругие напряжения приведены для характерных линий, положение которых дано на рисунках 2.4 – 2.9.

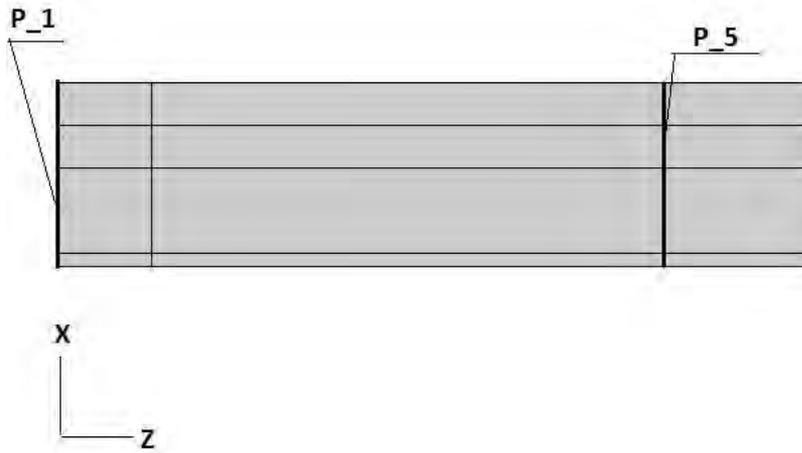


Рисунок 2.4 – Положение линий в сечении 1 (положение сечений смотри на рисунке 2.3)

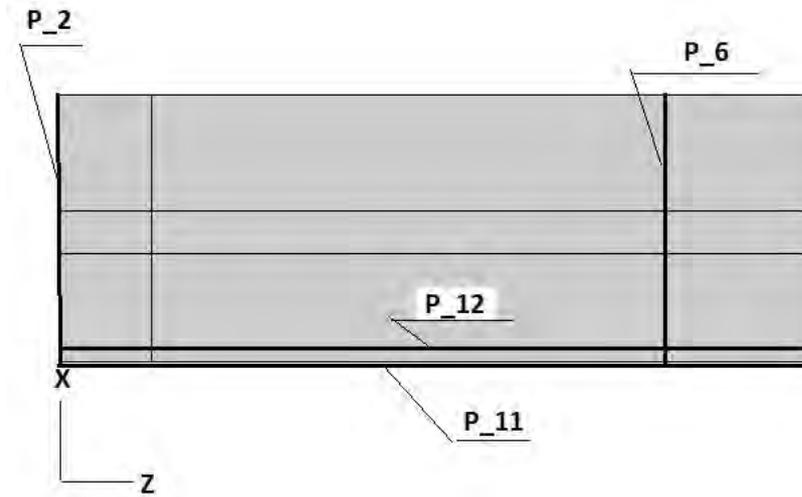


Рисунок 2.5 – Положение линий в сечении 2

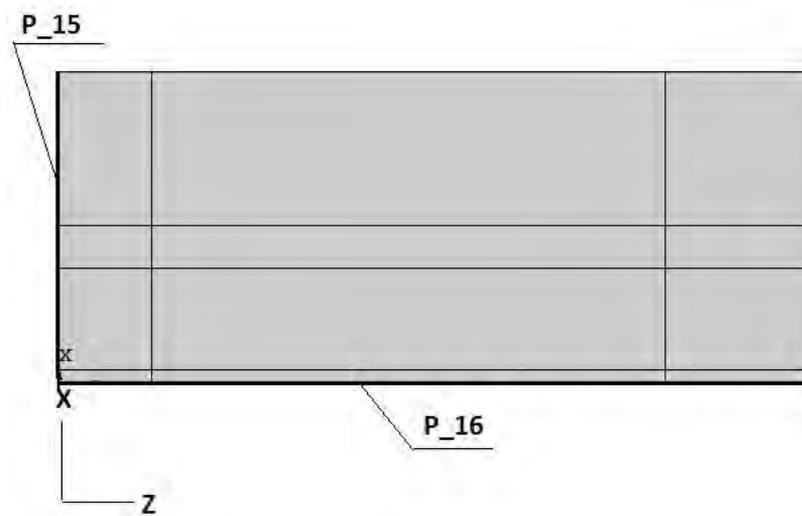


Рисунок 2.6 – Положение линий в сечении 3

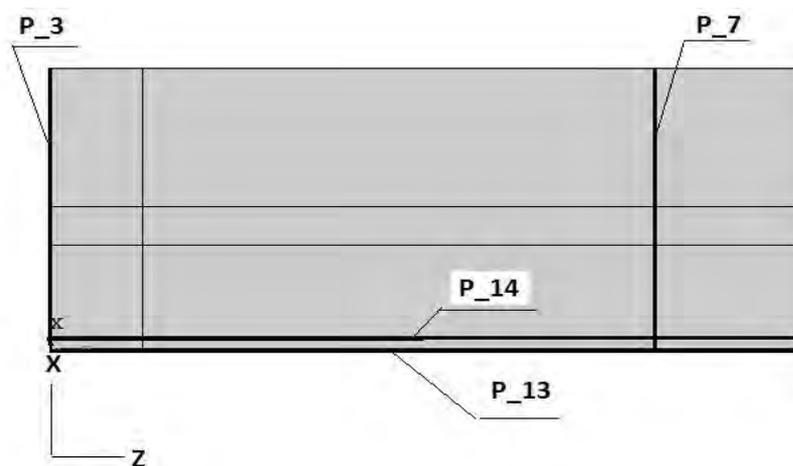


Рисунок 2.7 – Положение линий в сечении 4

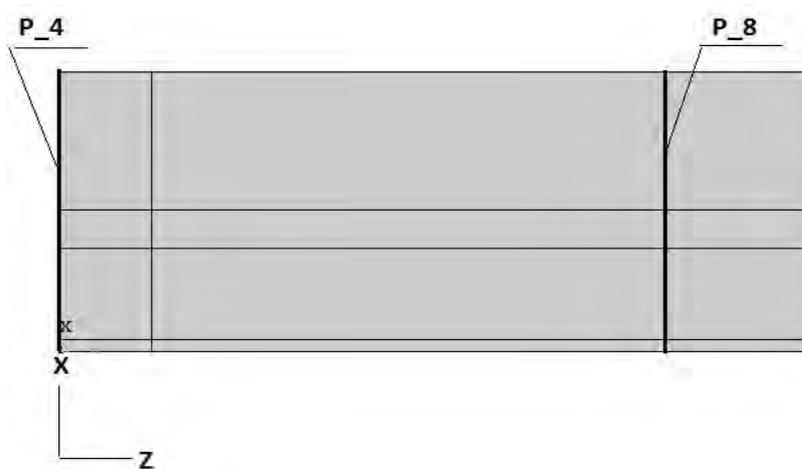


Рисунок 2.8 – Положение линий в сечении 5

линия P_10 находится от линии P_9 на глубине 5мм

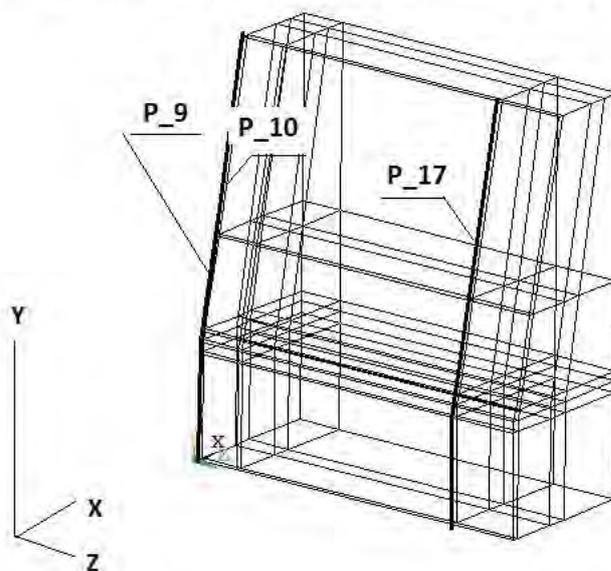


Рисунок 2.9 – Положение линий по высоте бойка

Напряжение в стенках-бойках при обжати заготовки определяются одновременно при исследовании напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации при получении листов из стали для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Для определения напряжений в стенках-бойках от усилия обжатия использованы зависимости (2.1 – 2.5) и алгоритм решения краевых задач теории упругости методом конечных элементов в объемной постановке [50-54].

2.2 Теория решения задач теории упругости методом конечных элементов в объемной постановке

Расчет напряженного состояния стенки-бойка от воздействия на него усилия обжатия можно определить на основе решения объемной задачи теории упругости методом конечных элементов (МКЭ) [44-49,55].

Ниже дана общая постановка объемной задачи теории упругости для стенки-бойка от воздействия на него только усилия обжатия..

В систему уравнений входят [52]:

- уравнение равновесия (без учета инерционных сил)

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (i = \overline{1,3}) \quad (2.1)$$

- геометрические соотношения Коши, связывающие компоненты малого перемещения и тензора деформаций

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (i,j = \overline{1,3}) \quad (2.2)$$

- физические (или определяющие) соотношения линейной теории упругости

$$\sigma_{ij} = \sum_{r,l=1}^3 C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} + \sigma_{ij}^{(0)}, (i,j = \overline{1,3}) \quad (2.3)$$

- граничные условия

$$\sum n_j \cdot \sigma_{ij} = \hat{t}_i \text{ на поверхность } S(i=\overline{1,3}) \quad (2.4)$$

$$u_i = \hat{U}_i \text{ на поверхности } S_2 (i = \overline{1,3}). \quad (2.5)$$

В уравнениях (2.1) – (2.5) использована декартова ортогональная система координат. Обозначения σ_{ij} , ε_{ij} , C_{ijkl} , $\sigma_{ij}^{(0)}$, n_j , u_i , f_i , \hat{t}_i , \hat{U}_i – представляют собой компоненты тензора напряжений, деформаций, упругих постоянных, начальных напряжений, векторов единичной внешней к поверхности нормали, перемещений, объемных и поверхностных сил, а также заданных перемещений соответственно. Начальные напряжения для расчета НДС бойка в данном случае принимаются нулевыми.

Для бойка поверхность S_1 является рабочей поверхностью бойка, которая контактирует с металлом очага деформации при обжатии заготовки. На данной поверхности задается усилие обжатия. Поверхность S_1 состоит из двух поверхностей $S_1 = S_{1-1} + S_{1-2}$. Положение этих поверхностей дано на рисунке 2.2.

Поскольку боек симметричен вдоль его длины, то расчет напряженного состояния бойка ведется только для половины длины бойка. Поэтому в нашем случае поверхность S_2 состоит из двух поверхностей $S_2 = S_{2-1} + S_{2-2}$. При этом поверхность S_{2-1} является поверхностью контакта бойка с суппортом, а поверхность S_{2-2} является плоскостью симметрии. На поверхности S_{2-1} задаются кинематические граничные условия - отсутствие перемещения в направлении трех координатных осей, а на поверхности S_{2-2} – отсутствие перемещений в направлении длины бойка.

Расчет напряженного состояния бойка в данной постановке производится в пакете ANSYS 15. [43]

При расчете напряженного состояния бойка от одного усилия обжатия (без учета термоупругих напряжений) принимаем, что он изготовлен из стали 45ХНМ. При этом принимаем, что материал бойка однороден и изотропен с модулем упругости 216000 МПа и коэффициентом Пуассона 0,3.

Для расчета напряженного состояния в пакете строится геометрическая модель бойка. Геометрия бойка, принятая для расчета приведена на рисунке 2.1. Для расчета, как указано выше, задаем свойства материала (модуль упругости и коэффициент Пуассона).

В качестве конечного элемента выбираем структурный объемный конечный элемент SOLID185. Геометрию модели разбиваем конечно - элементной сеткой. При создании сетки конечных элементов для разных областей бойка используем различный размер элемента. Вблизи рабочей поверхности и каналов элемента размер элементов принят равным 1мм. На удалении на 5мм от рабочей поверхности бойка и на 5мм по радиусу от каналов размер элемента принят равным 4мм. Количество элементов и узлов разбиения для принятых размеров элементов равно соответственно 306362 и 334560.

После создания конечно – элементной модели переходим к заданию граничных условий.

На рабочей поверхности стенки-бойка задаем удельное давление. Характер и величина удельного давления соответствуют получению стальной полосы толщиной 3мм. Положение поверхности, характер и величина удельного давления даны на рисунке 2.2.

2.3. Напряженное состояние стенок-бойков без каналов сборного кристаллизатора от воздействия усилия обжатия

Расчет производился при максимальном усилии обжатия, которое возникает при получении листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм из стали 09Г2С на установке совмещенного процесса непрерывного литья и

деформации. Материал стенки-бойка - сталь 45ХНМ. Теплофизические свойства данной стали приведены в таблице 2.1. Геометрия стенки-бойка без каналов для охлаждения дана на рисунке 2.1. Характер нагружения стенки-бойка соответствует нагружению стенки-бойка с каналами и приведен на рисунке 2.2.

Для расчета в силу симметрии принята половина стенки-бойка. Плоскость XYZ – плоскость симметрии (рисунок 2.1). Результаты даны для стенки-бойка без каналов на поверхности контакта заготовки со стенкой-бойком в зоне очага циклической деформации и на части калибрующего участка стенки-бойка. Результаты расчета напряженного состояния стенки-бойка без каналов сборного кристаллизатора от усилия обжатия при получении листа сечением 3×2250 мм из стали 09Г2С приведены на рисунках 2.10-2.18 и в таблицах 2.2 и 2.3.

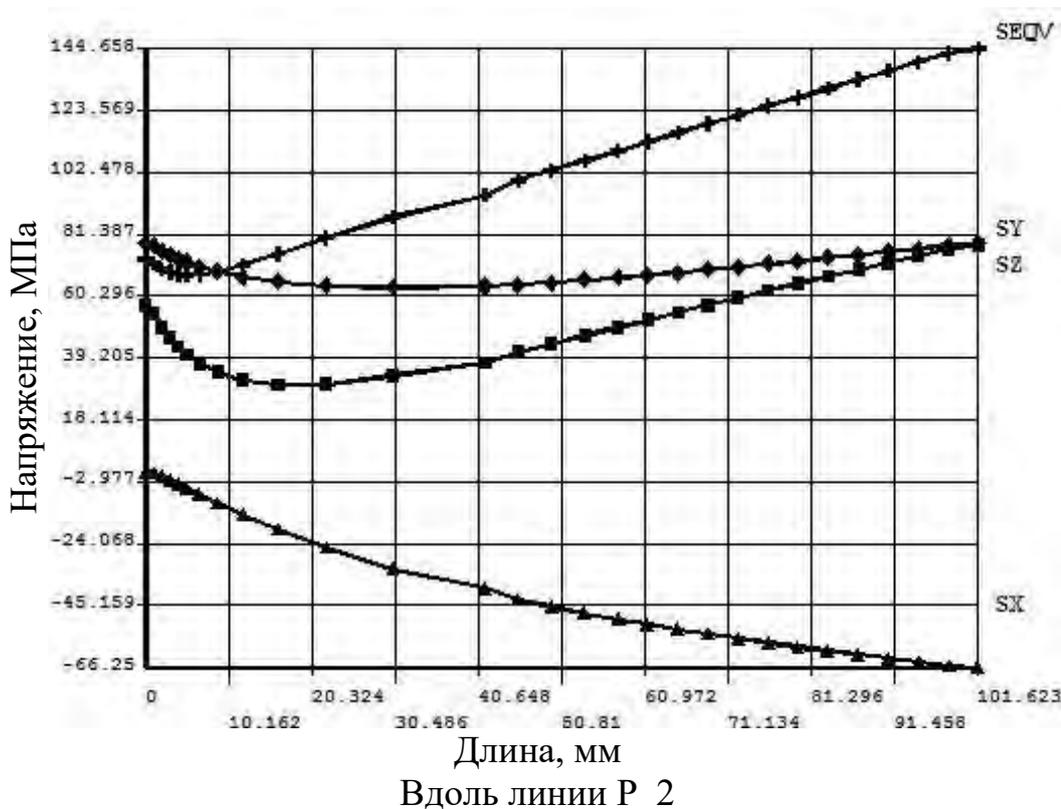


Рисунок 2.10 – Характер напряжений вдоль линии P_2 от воздействия на боек без каналов только усилия обжатия.

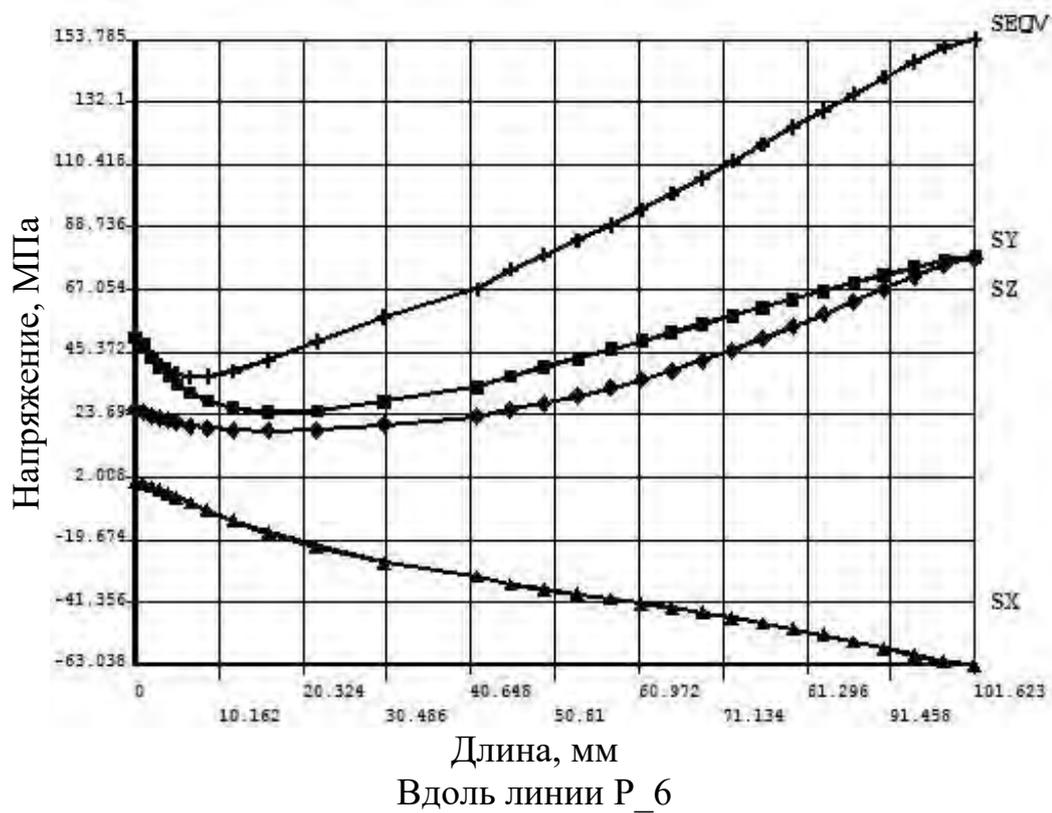


Рисунок 2.11 – Характер напряжений вдоль линии P_6 от воздействия на боек без каналов только усилия обжатия

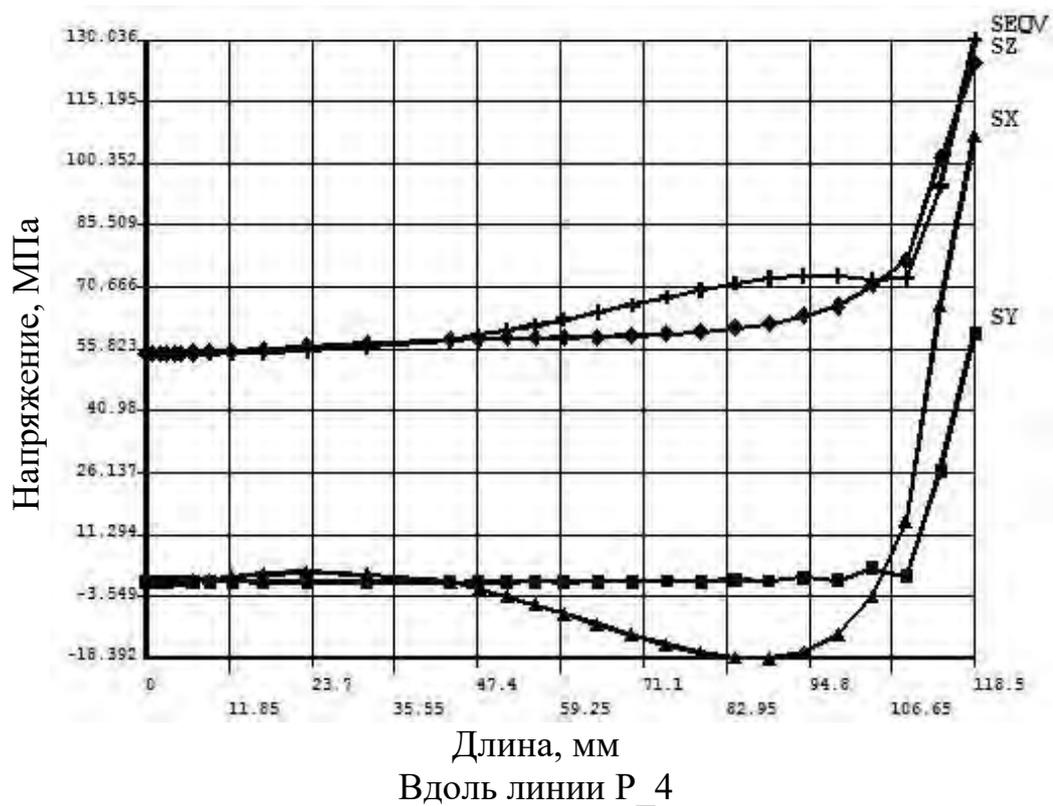
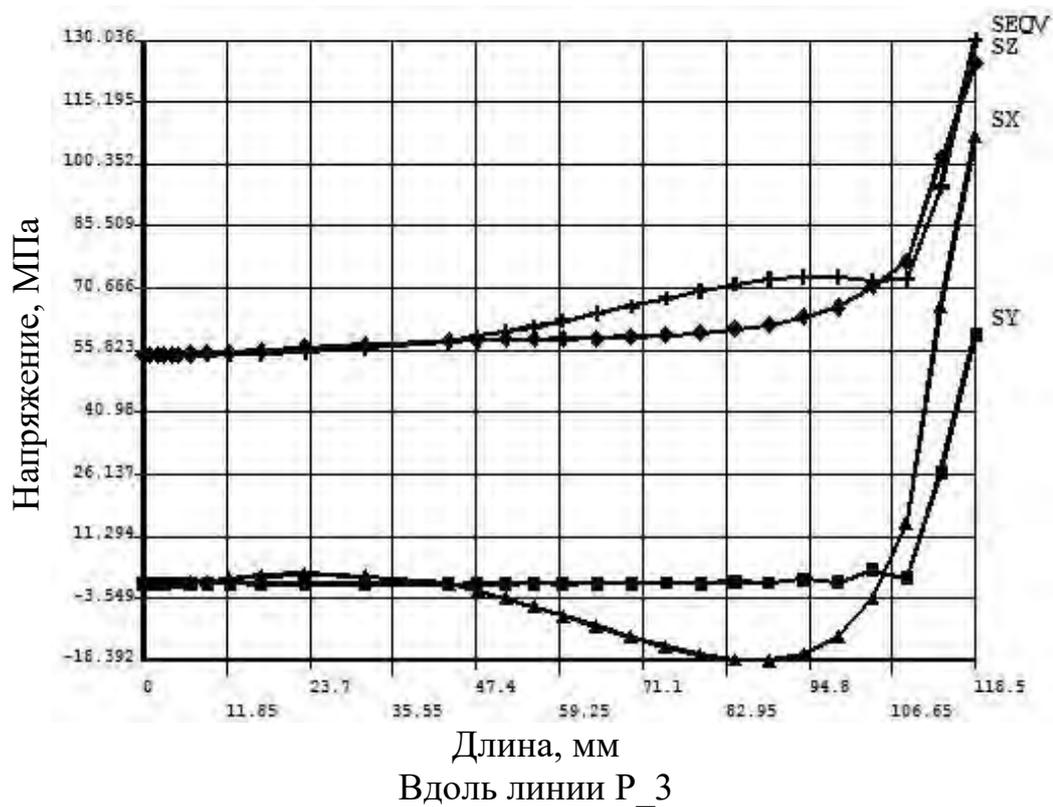


Рисунок 2.12 – Характер напряжений вдоль линий P_3 и P_4 от воздействия на боек без каналов только усилия обжатия

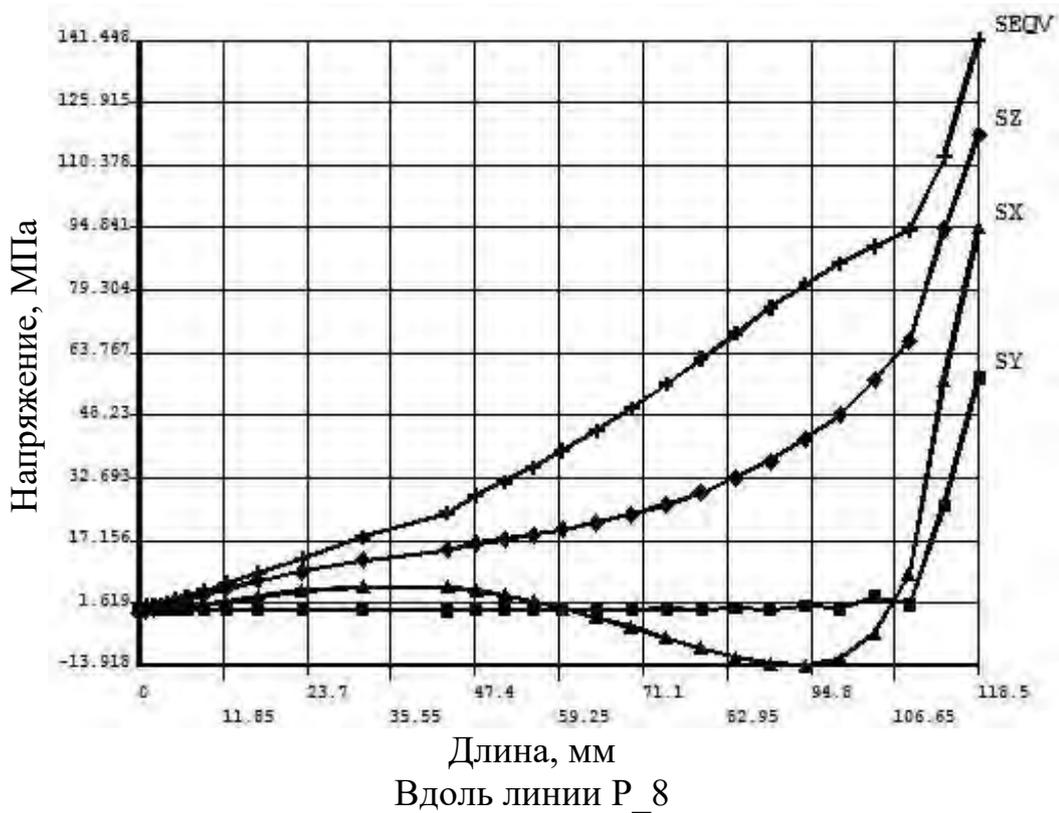
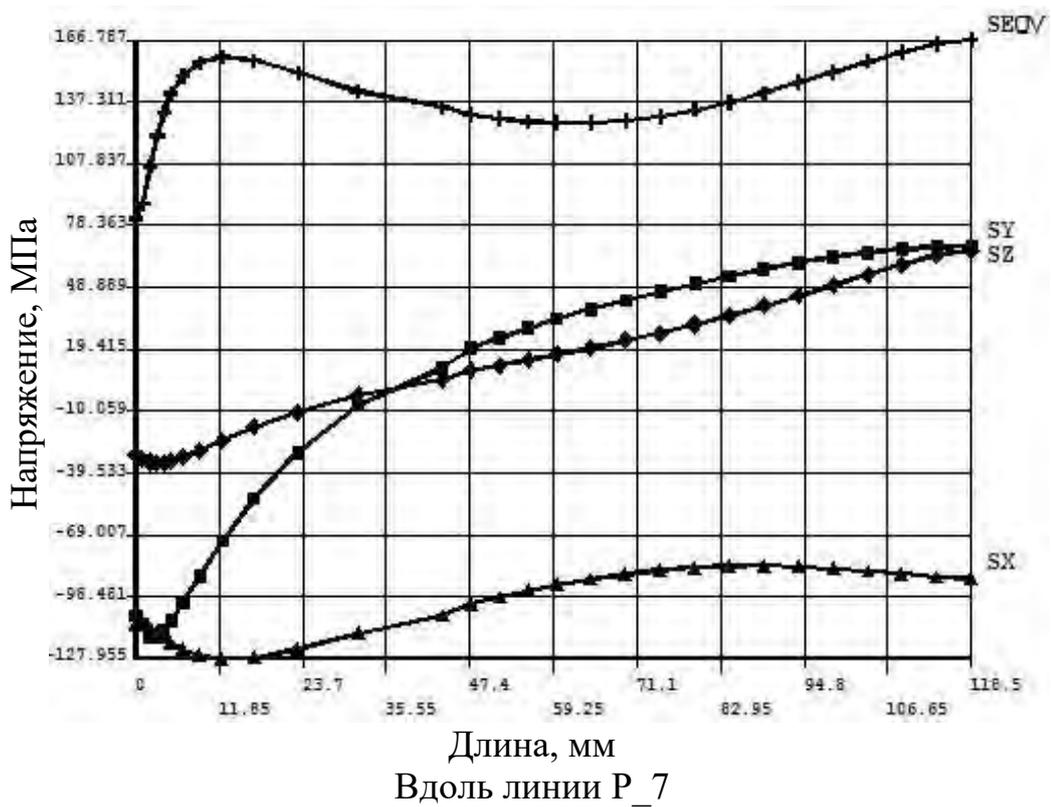


Рисунок 2.13 – Характер напряжений вдоль линий P_7 и P_8 от воздействия на боек без каналов только усилия обжатия

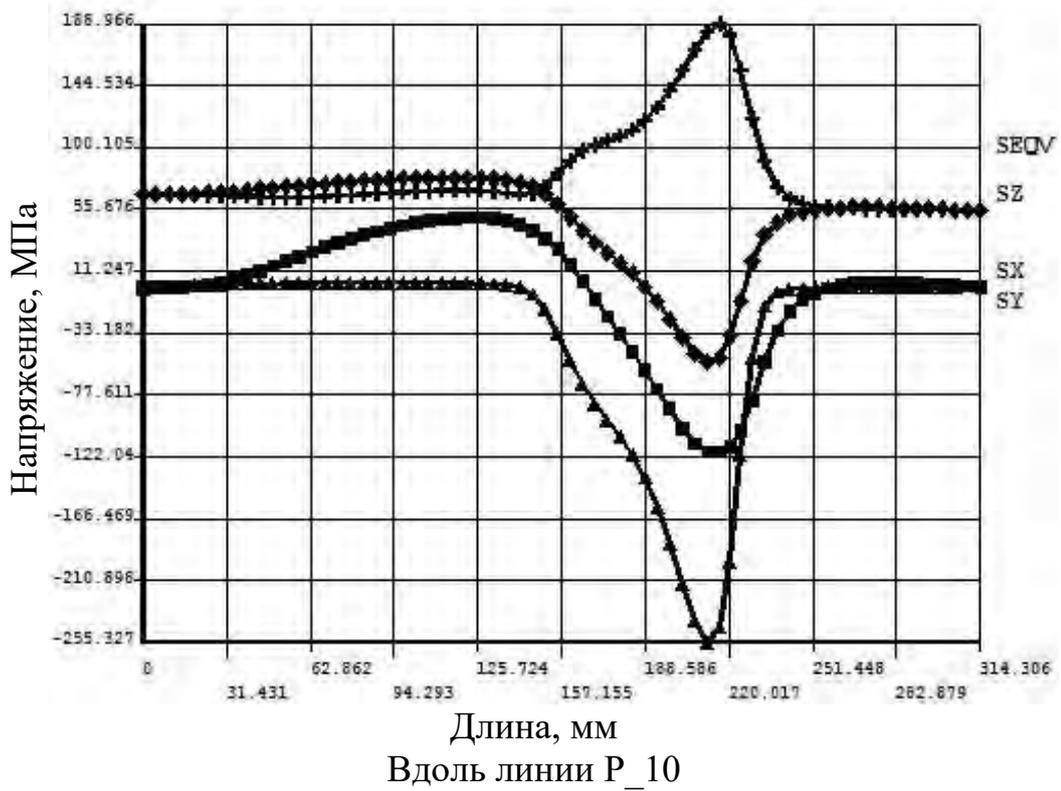
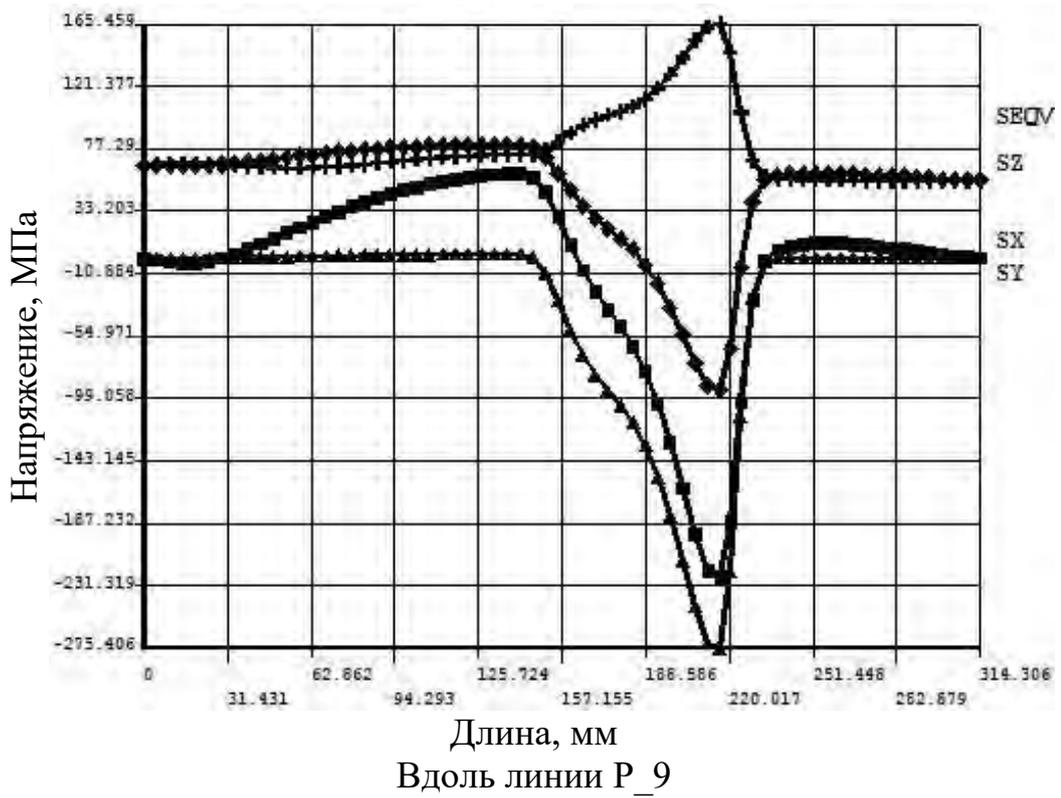


Рисунок 2.14 – Характер напряжений вдоль линий P_9 и P_10 от воздействия на боек без каналов только усилия обжатия

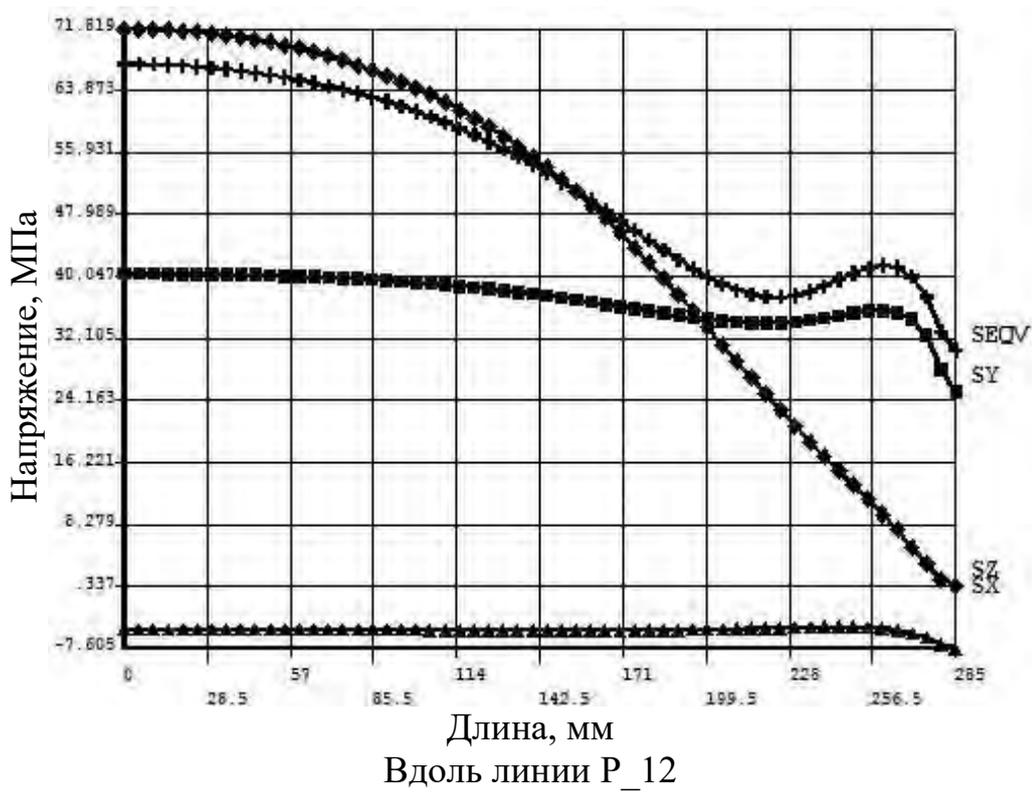
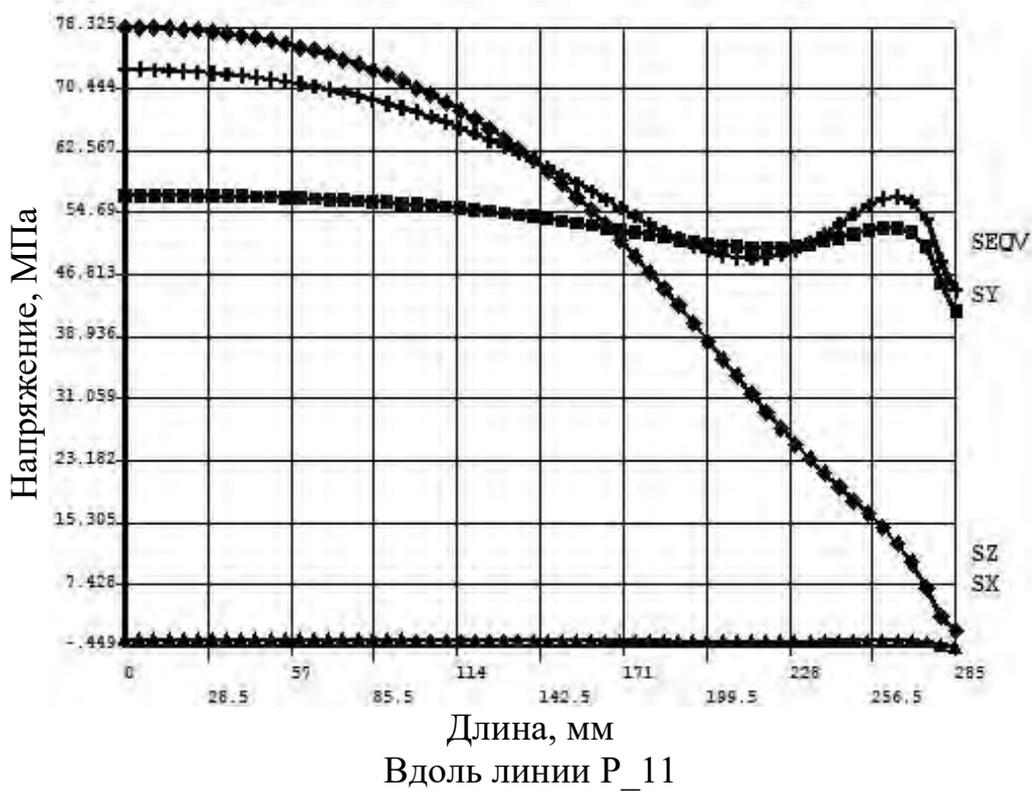


Рисунок 2.15 – Характер напряжений вдоль линий P_11 и P_12 от воздействия на боек без каналов только усилия обжатия

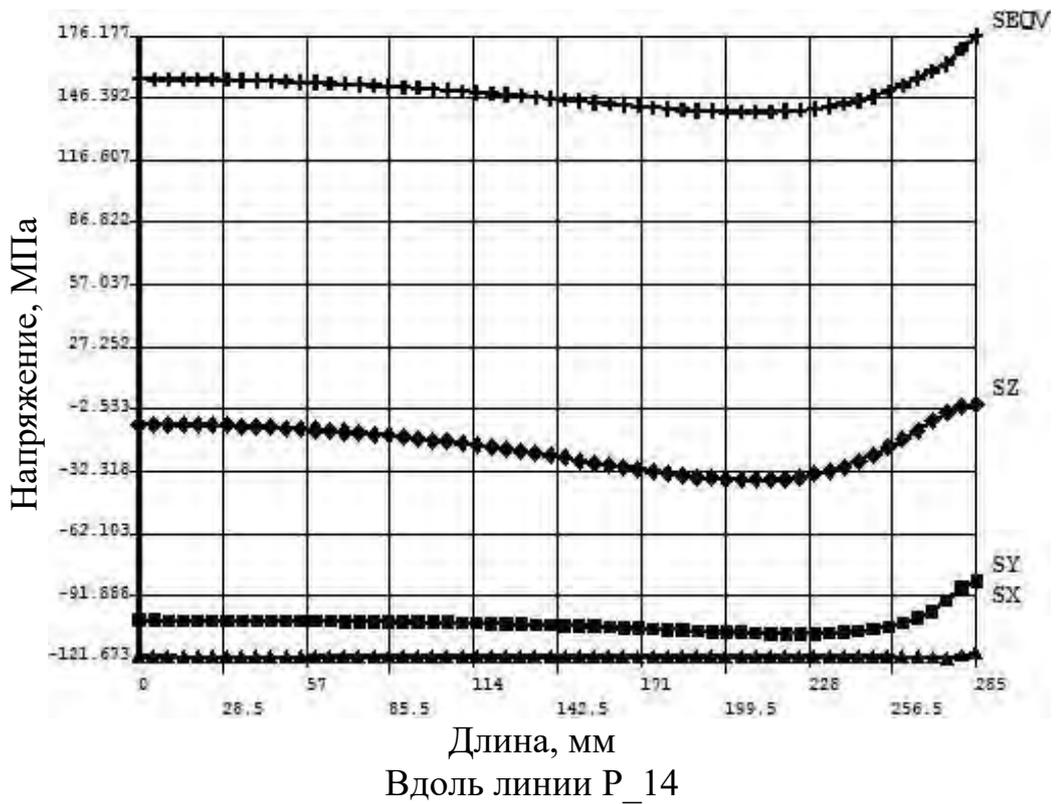
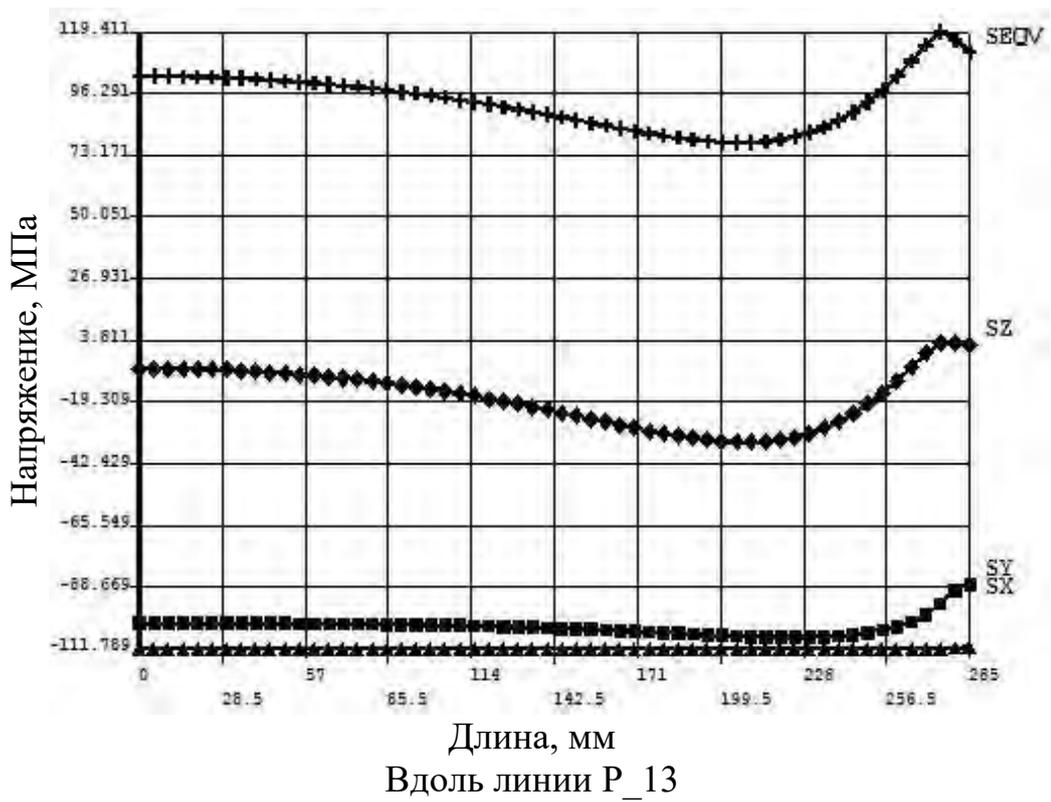


Рисунок 2.16 – Характер напряжений вдоль линий P_13 и P_14 от воздействия на боек без каналов только усилия обжатия

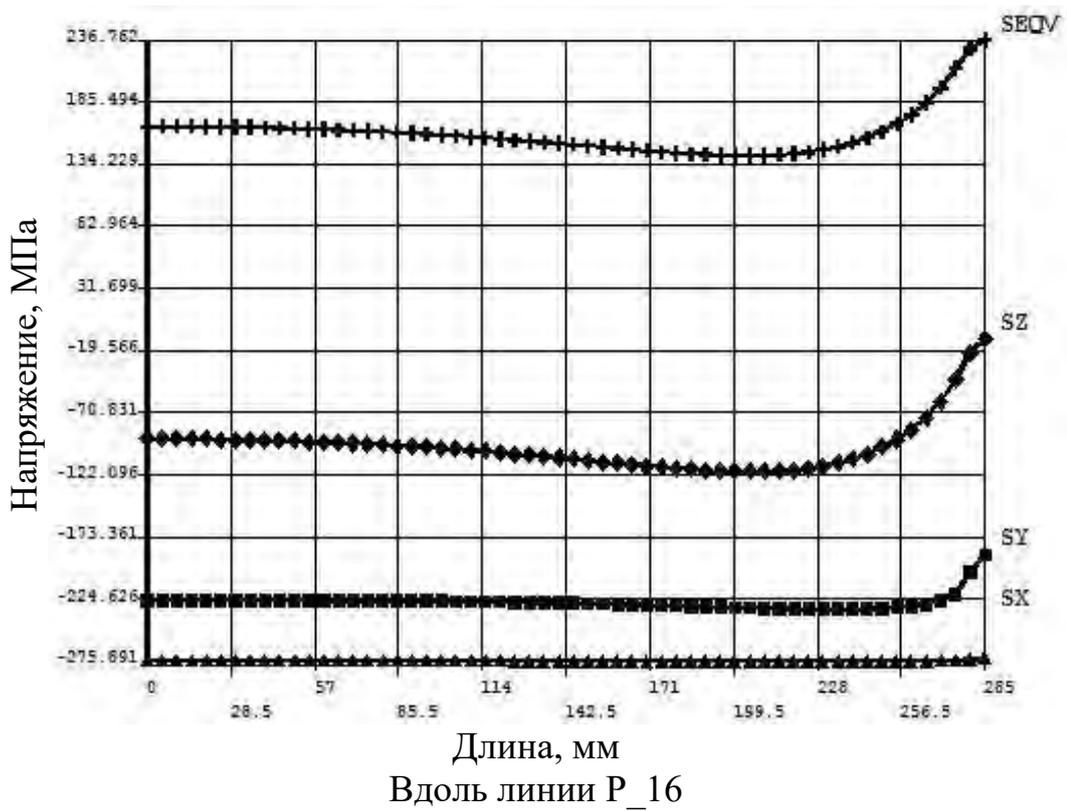
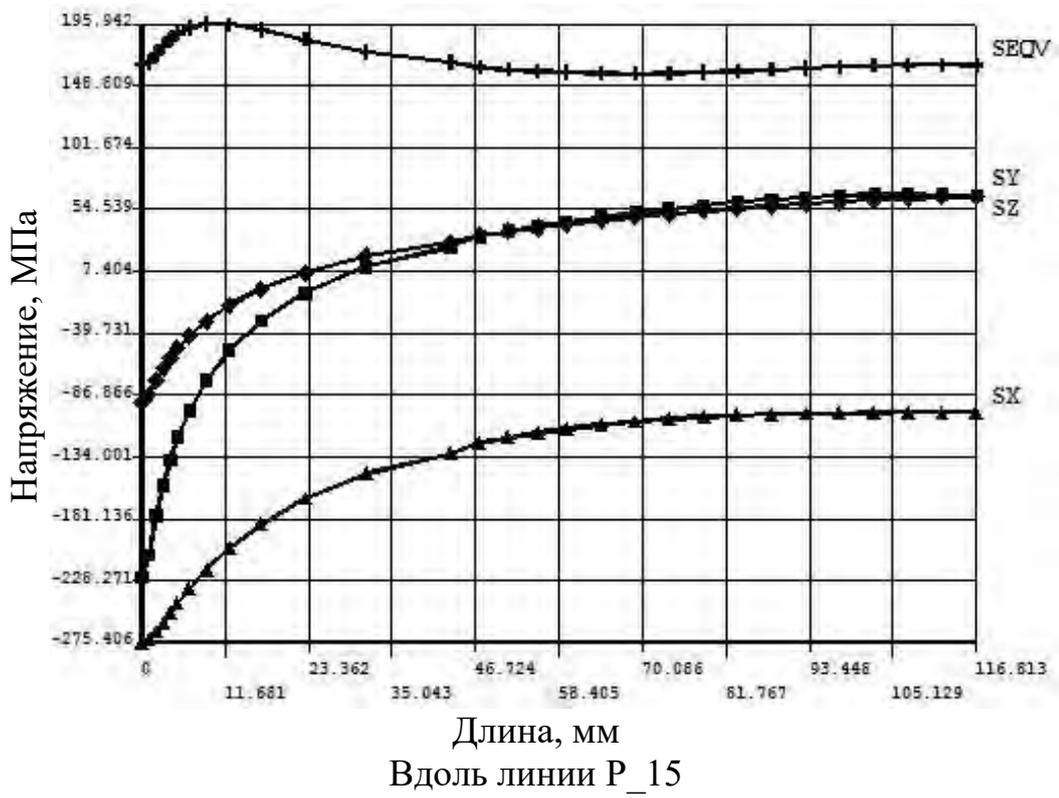


Рисунок 2.17 – Характер напряжений вдоль линий P_15 и P_16 от воздействия на боек без каналов только усилия обжатия

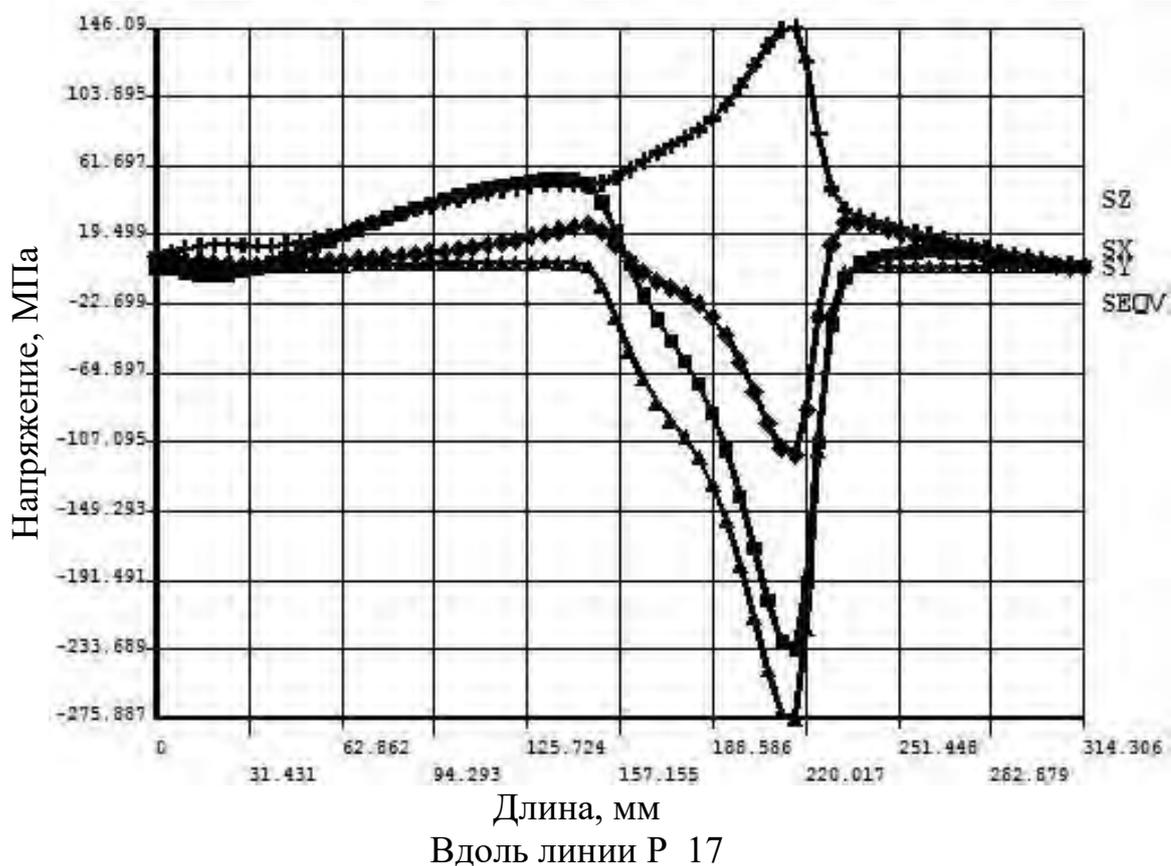


Рисунок 2.18 – Характер напряжений вдоль линий P_17 от воздействия на боек без каналов только усилия обжатия

Таблица 2.2 – Распределение осевых напряжений от усилия обжатия по толщине и высоте стенки-бойка без каналов

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС
2, P2	-3	-66	58	81	80	78	78	144
4, P3	-2	107	-2	58	55	125	55	130
5, P4	-1	107	-1	61	55	120	55	130
2, P6	2	-63	45	78	23	78	45	153
4, P7	-113	-92	-113	63	-34	63	78	166
5, P8	3	94	3	58	3	117	3	141
линия P9	-2	-275	-2	-231	67	-99/55	67	165
линия P10	-2	-255	-2	-122	64	-55/64	64	166

*ТС – Распределение напряжений по толщине стенки-бойка

Таблица 2.3 – Распределение осевых напряжений от усилия обжатия по толщине приконтактного слоя, ширине и высоте стенки-бойка без каналов

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	ОС	КС	ОС	КС	ОС	КС	ОС	КС
2, P11	0	0	56	42	78	2	73	46
2, P12	-5	-7	40	24	0	71	67	32
4, P13	-111	-111	-100	-88	-8	4	104	119
4, P14	-121	-121	-105	-86	-9	-2	150	176
3, P15	-275	-98	-86	66	-228	66	163	168
3, P16	-275	-275	-224	-185	-96	-21	160	236
линия P17	-2	-275	-2	-233	-2	-115	2	146

*ОС – по оси симметрии стенки-бойка

*КС – вертикальный край стенки-бойка

Рисунки 2.10 и 2.11 характеризуют распределение осевых напряжений от усилия обжатия по толщине и высоте стенки-бойка. В сечении 2 осевые напряжения SY и SZ растягивающие, которые от контактной поверхности стенки-бойка по его толщине возрастают, достигая значений 80 МПа. Высокие растягивающие напряжения имеют место в сечении 5 в направлении осей X и Z, достигая значений 94-120 МПа. В отличие от других сечений, в сечении 4 (линии P7) при обжатии заготовки на контактной поверхности стенки-бойка возникают сжимающие осевые напряжения величиной минус 98 – 113 МПа, которые, кроме напряжения SX, переходят в растягивающие, достигая значений 63÷78 МПа (рисунок 2.11).

Очень важно оценить распределение осевых напряжений от усилия обжатия по толщине приконтактного слоя и по высоте стенки бойка (рисунок 2.14). На рисунке 2.14 и в таблице 2.2 приведены результаты расчета, которые характеризуют закономерности распределения осевых напряжений в приконтактном слое, как по высоте, так и по ширине стенки-бойка без каналов. Наибольшие сжимающие напряжения в стенке-бойке возникают в области очага деформации заготовки и достигают в направлении осей X, Y и Z соответственно значений минус 275 МПа, минус 231 МПа и минус 99 МПа.

В приконтактном слое стенки-бойка на глубине 5 мм осевые напряжения от усилия обжатия несколько меньше (рисунок 2.14).

Рисунки 2.15-2.17 характеризуют закономерности распределения осевых напряжений в приконтактном слое стенки-бойка без каналов от усилия обжатия по его высоте. Наибольшее сжимающее напряжение в приконтактном слое стенки бойка имеет в направлении осей X, Y и Z, достигая в сечении 3 значений минус 224 МПа – 275 МПа (рисунок 2.17, таблица 2.3). В сечении 4 осевые сжимающие напряжения значительно ниже, но они распределяются по ширине стенки-бойка без каналов равномерно (рисунок 2.16).

На рисунке 2.18 показано распределение осевых напряжений на контактной поверхности стенки-бойка по его высоте. Наибольшие сжимающие напряжения от усилия обжатия возникают в направлении осей X и Y и соответственно равны минус 275 МПа и минус 233 МПа.

2.4. Выводы

1. Поставлена и решена объемная задача определения напряженного состояния стенки-бойка без каналов от воздействия усилия обжатия при получении листов из стали для сварных труб на установке непрерывного литья и деформации.

2. Установлены закономерности распределения осевых и эквивалентных напряжений в стенках-бойках без каналов установки. Наибольшие сжимающие напряжения в стенке-бойке без каналов возникают в области очага деформации сляба в направлении осей X и Y и соответственно равны минус 275 МПа и минус 233 МПа.

3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНОК-БОЙКОВ БЕЗ КАНАЛОВ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

3.1 Методика расчета температурных полей и термоупругих напряжений в пакете ANSYS

Для расчета напряженного состояния стенки-бойка, на который воздействует температурное поле и усилие обжатия, необходимо в пакете ANSYS для стенки-бойка выполнить термо-прочностной анализ [43].

В программе ANSYS доступны два способа связывания теплового и прочностного анализов.

Один способ предусматривает проведение совместного термо-прочностного решения. В программе ANSYS это достигается использованием конечных элементов связанной задачи, которые имеют как тепловые, так и прочностные степени свободы. Из этих элементов создается расчетная модель и задаются тепловые и механические граничные условия. На каждой итерации выполняется решение тепловой и прочностной задач с использованием значений температур и перемещений, полученных на предыдущей итерации.

Другой способ состоит в том, что эти два анализа делаются друг за другом. Сначала рассчитывают температурное поле модели стенки-бойка для заданных граничных условий теплообмена и заданных теплофизических параметрах материала стенки-бойка, то есть на первом этапе решается задача теплообмена, результатом которой является температурное поле стенки-бойка. При этом используется тепловой конечный элемент, имеющий тепловые степени свободы (в нашем случае использован объемный элемент SOLID70). Значения полученных температур затем используются в виде нагрузок на стадиях препроцессорной подготовки и получения решения при

последующем прочностном анализе. Для этого используют структурный конечный элемент, имеющий прочностные степени свободы (в нашем случае использован объемный элемент SOLID185). Кроме этого для материала стенки-бойка необходимо задать модуль упругости и коэффициент Пуассона в зависимости от температуры.

Такая возможность удобна при определении влияния температурного поля на напряжения, возникающие в стенке-бойке. При этом можно задать тепловую нагрузку отдельно или же в совокупности с механическими нагрузками. Если задаем только тепловую нагрузку, то в результате определяем напряжения только от температурного поля (в этом случае определяем термоупругое напряженное состояние стенки-бойка без учета механического воздействия на боек, в данном случае без усилия обжатия).

Если же прикладываем к бойку тепловую нагрузку в совокупности с механической нагрузкой, (в данном случае усилие обжатия), то в результате получаем напряжения от совместного воздействия на стенку- боек тепловой нагрузки и усилия обжатия (таким образом, получаем суммарное напряженное состояние от тепловой нагрузки и усилия обжатия).

Следует отметить, что прикладываемое усилие обжатия в нашем случае принималось из решения задачи обжатия стенками-бойками стальной полосы при получении листа толщиной 3мм. Для расчета усилия обжатия и его закона по высоте рабочей части стенки-бойка решалась отдельная структурная задача.

Для расчета напряженного состояния стенки-бойка (расчета температурного поля при рабочем ходе и во время паузы, расчета термоупругого напряженного состояния стенки-бойка, как от воздействия на него только температурного поля, так и при одновременном нагружении стенки-бойка усилием обжатия и температурным полем в конце обжатия полосы) использован именно этот способ, поскольку он менее затратен, как по процессорному времени расчета вариантов, так и по занимаемому для записи результатов расчета дисковому пространству.

Таким образом, расчеты теплового и напряженного состояния бойков для каждой тепловой нагрузки (заданных граничных условий теплообмена), заданных теплофизических и механических свойствах материала бойков, а также геометрии бойков выполнялись в следующей последовательности:

1. При принятом тепловом элементе SOLID70, заданных граничных условиях теплообмена и принятых теплофизических параметрах материала стенки-бойка (плотности, теплопроводности и теплоемкости) определялось температурное поле стенки-бойка в конце обжатия заготовки и в конце паузы. При этом время обжатия принято равным 0.1364 сек., а время паузы – 0.4092 сек.
2. При принятом структурном элементе SOLID185, модуле упругости и коэффициенте Пуассона, а также температурном поле в конце рабочего хода (из решения задачи на первом этапе) определялось термоупругое напряженное состояние стенки-бойка в конце рабочего хода.
3. При принятом структурном элементе SOLID185, модуле упругости и коэффициенте Пуассона, а также температурном поле в конце паузы (из решения задачи на первом этапе) определялось термоупругое напряженное состояние стенки-бойка в конце паузы.
4. Кроме результатов температурных полей и термоупругих напряжений в конце рабочего хода и в конце паузы (смотри пункты 1...3) при структурном элементе SOLID185, модуле упругости и коэффициенте Пуассона, а также заданной нагрузке от одного усилия обжатия определялось напряженное состояние стенки-бойка.
5. Кроме результатов от одного обжатия, определялось напряженное состояние от совместного воздействия на боек усилия обжатия и температурного поля в конце рабочего хода (из решения задачи на первом этапе). Расчет выполнялся при структурном элементе SOLID185.

Для вариантов по пунктам 1-5 при выполнении расчетов дополнительно к вышеуказанным в каждом пункте граничным условиям на поверхности, контактирующей с суппортом, задавались кинематические граничные условия (отсутствие перемещений в направлении трех координатных осей). Кроме того, поскольку стенка-бойка симметричен, то расчет выполнялся для половины стенки-бойка. А на плоскости симметрии задавались нулевые перемещения в направлении длины стенки-бойка. Более подробно все граничные условия будут описаны в соответствующих разделах.

3.2. Варианты расчета температурных полей стенок бойков

Расчет температурных полей производился методом конечных элементов в объемной постановке в пакете ANSYS 15.0.

Расчет производился для стенки-бойка без каналов охлаждения, геометрия которого дана на рисунке 2.1.

Варианты расчета температурных полей даны ниже. Там же указаны граничные условия, принятые при расчете вариантов. Обоснование граничных условий и их конкретных значений будут даны ниже в соответствующих разделах.

Вариант 1. При расчете температурного поля приняты следующие граничные условия:

1. на торце стенки-бойка, задней стенке, сверху и снизу стенки-бойка – охлаждение водой с коэффициентом теплоотдачи $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и температурой окружающей среды – $60 \text{ }^\circ\text{C}$;
2. на рабочую поверхности стенки-бойка во время рабочего хода в течение 0.1364 секунды действует плотность теплового потока – $20 \text{ МВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Во время паузы ($0,1364 \times 3$ секунды) – эффективный коэффициент теплоотдачи $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для данного варианта на торце, задней стенке, сверху и снизу стенки-бойка принято охлаждение водой. Дополнительно выполнен расчет при задании на торце стенки-бойка, задней стенке, сверху и снизу стенки-бойка охлаждение воздухом. Пока же отметим, что при принятых граничных условиях максимальная температура рабочей поверхности стенки-бойка без каналов во время рабочего хода увеличилась до 511 °С по сравнению с температурой стенки-бойка с каналами охлаждения, где она достигала величины 400 °С [24,26].

В результате расчета установлено, что охлаждение торца стенки-бойка, задней стенки, верха и низа стенки-бойка воздухом практически не повлияло на максимальную температуру рабочей поверхности при рабочем ходе. Как и для варианта 1 максимальная температура рабочей поверхности осталась на уровне 511 °С. Отсюда следует, что на максимальную температуру рабочей поверхности стенки-бойка оказывают плотность теплового потока при рабочем ходе и эффективный коэффициент теплоотдачи во время паузы.

Поскольку эти параметры можно определить лишь приближенно путем численного моделирования и сравнения этих результатов с экспериментальными данными, которые для данного процесса отсутствуют. Поэтому результаты расчета по варианту 1 будем считать верней оценкой температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках установки. В связи с этим, для оценки влияния на максимальную температуру рабочей поверхности стенки-бойка без каналов плотности теплового потока при рабочем ходе и эффективного коэффициента теплоотдачи во время паузы выполнен еще один вариант (вариант 2).

Вариант 2. При расчете температурного поля приняты следующие граничные условия:

1. на торце стенки-бойка, задней стенке, сверху и снизу стенки-бойка – охлаждение водой с коэффициентом теплоотдачи 500 Вт/(м²·К) и температурой окружающей среды – 60 °С;

2. на рабочую поверхности стенки-бойка во время рабочего хода в течение 0.1364 секунды действует плотность теплового потока – 10 МВт/(м²·К). Во время паузы (0.1364×3 секунды) – эффективный коэффициент теплоотдачи 2000 Вт/(м²·К).

Данный вариант следует сравнивать с вариантом расчета 1. Целью данного расчета, как указывалось выше в комментариях к варианту расчета 1, является оценка влияния на температурное поле стенки-бойка величины плотности теплового потока на рабочую поверхность стенки-бойка во время рабочего хода, а также эффективного коэффициента теплоотдачи во время паузы.

Как показали результаты ниже выполненного расчета, уменьшение в два раза плотности теплового потока при рабочем ходе и эффективного коэффициента теплоотдачи во время паузы привело к уменьшению максимальной температуры с 511 °С до 312 °С. Таким образом будем считать результаты расчета по этому варианту нижней оценкой температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках установки.

Вариант 3. При расчете температурного поля приняты следующие граничные условия:

1. на торце бойка, задней стенке, сверху и снизу бойка – охлаждение на воздухе с коэффициентом теплоотдачи 20 Вт/(м²·К) и температурой окружающей среды – 60 °С;

2. на рабочую поверхности бойка во время рабочего хода в течение 0.1364 секунды действует плотность теплового потока – 20 МВт/(м²·К). Во время паузы (0.1364×3 секунды) – эффективный коэффициент теплоотдачи 2000 Вт/(м²·К).

Отметим, что охлаждение торца бойка, задней стенки, верха и низа бойка воздухом практически не повлияло на максимальную температуру рабочей поверхности при рабочем ходе. Как и для варианта 1 максимальная температура рабочей поверхности осталась на уровне 511 °С. Отсюда следует, что на максимальную температуру рабочей поверхности бойка

оказывают плотность теплового потока при рабочем ходе и эффективный коэффициент теплоотдачи во время паузы. Поэтому, для бойка без каналов для оценки влияния на максимальную температуру рабочей поверхности стенки- бойка плотности теплового потока при рабочем ходе и эффективного коэффициента теплоотдачи во время паузы выполнен еще один вариант (вариант 2).

Приведенные варианты расчета показывают влияние граничных условий на температурное поле стенки-бойка. Для реальной же оценки температурного поля стенки-бойка требуется проведение замеров на реальном оборудовании и при реальном процессе.

3.3. Теория расчета температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках методом конечных элементов в объемной постановке

Температурное поле бойков определяется на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности (3.1) с соответствующими начальными и граничными условиями [56-58].

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (3.1)$$

где c – теплоемкость;

ρ - плотность;

λ - коэффициент теплопроводности.

Все коэффициенты принимаем в зависимости от температуры бойков. Начальное условие для функции $T(\vec{X}, t)$ имеет вид

$$T(\vec{X}, t) = T_0(\vec{X}), \quad (3.2)$$

Принимаем начальную температуру бойков, равной 20 °С.

При рабочем ходе для рабочей поверхности стенки-бойка принимаются граничные условия второго рода

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s (t) = q, \quad (3.3)$$

В период паузы для рабочей поверхности стенки-бойка принимаются граничные условия третьего рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_1 (T - T_k), \quad (3.4)$$

На торце стенки-бойка, задней стенке, сверху и снизу стенки-бойка принимаются граничные условия третьего рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_2 (T - T_e), \quad (3.5)$$

В формулах (3.3)...(3.5) приняты следующие обозначения:

q – плотность теплового потока от металла очага деформации;

T_k - температура воды, подающаяся на рабочую поверхность во время паузы (принимается равной 60°C);

T_e - температура окружающей среды со стороны торца стенки-бойка, задней стенки, верха и низа стенки-бойка, (принимается равной 60°C);

a_1 – эффективный коэффициент теплоотдачи, принятый на рабочую поверхность во время паузы;

a_2 – коэффициент теплоотдачи при охлаждении задней стенки, верха и низа стенки-бойка водой либо воздухом в зависимости от варианта расчета.

В данной постановке одним из допущений является то, что при расчете температурных полей бойков пренебрегаем величиной теплового потока от излучаемого металла, что связано с неопределенностью параметров для его определения.

Уравнения (3.1) – (3.5) образуют начальную краевую задачу определения нестационарного поля температур для несвязанной задачи теплопроводности для стенки-бойка без каналов.

По найденному полю температур в последующем в каждый момент времени можно определить поле деформаций и термоупругих напряжений в соответствии со следующим алгоритмом.

Покажем сначала особенности математической постановки и алгоритма расчета методом конечных элементов термоупругих состояний рассчитываемых тел, подверженных нестационарному термомеханическому нагружению.

Для того, чтобы учесть температурные эффекты, обычно исходят из предположения, что упругая и температурная деформация аддитивны. Тогда можно записать основное определяющее соотношение для напряжений в виде

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \alpha_{kl} \Delta T), \quad (3.6)$$

где α_{kl} - тензор коэффициентов термического расширения;

ΔT - изменение температуры, отсчитанное от естественного (ненапряженного и недеформированного) состояния

$$\Delta T = T - T_0$$

Соотношение (3.6) называемое соотношением Дюамеля – Неймана, лежит в основе линейной термоупругости [52, 59].

Для тел, механические и теплофизические свойства которых изотропны, соотношение (3.6) принимает вид [69]:

$$\sigma_{ij} = 2G \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \delta_{ij} - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha \Delta T \delta_{ij} \right), \quad (3.7)$$

где G - модуль сдвига;

μ - коэффициент Пуассона;

δ_{ij} - символ Кронекера;

e - объемное расширение, $e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$.

Последнее слагаемое в правой части формулы (3.7) отражает влияние на напряжения температурной деформации.

Если ввести обозначение

$$\sigma_{ij}^{(0)} = -2G \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha \Delta T \delta_{ij}, \quad (3.8)$$

то определяющее уравнение (3.7) примет вид уравнения

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \sigma_{ij}^{(0)} \quad (i, j = \overline{1,3}), \quad (3.9)$$

где начальные напряжения заменены соответствующими напряжениями от температурной деформации.

Таким образом, если температурное поле в области известно, то соотношения МКЭ (3.6) – (3.9) применимы к задачам термоупругости, где все параметры являются функциями температуры.

Таким образом, для определения термоупругих напряжений в бойке необходимо:

- в каждый момент времени определить температурное поле во всех узлах конечно-элементной сетки;
- затем для данного момента времени решить объемную задачу теории упругости. При этом в качестве граничных условий необходимо задать на всей поверхности стенки-бойка только отсутствие внешних сил. Тогда разрешающие уравнения (3.6)...(3.9) позволят найти температурные перемещения во всех узлах конечно-элементного разбиения, а затем определяются и температурные деформации и напряжения.

Данная схема выполнения расчетов повторяется и реализована в одном из модулей пакета ANSYS 15 [43].

3.4. Теплофизические параметры материала бойков

Материал стенки-бойка - 45ХНМ. Теплофизические свойства для данной марки стали даны в таблице 2.1.

Поскольку нет никаких данных о температурном поле бойков для данного процесса, то изначально посчитали, что температура наружных слоев бойков на рабочей поверхности при рабочем ходе не превосходит 700°C (по литературным данным [61] температура штампов прессового инструмента может кратковременно достигать температур порядка $700\dots 750^{\circ}\text{C}$). Поэтому теплофизические параметры приняли для диапазона температур от 20°C до 700°C .

3.5. Выбор системы коэффициентов, необходимых для решения задачи о тепловой нагруженности стенок- бойков

Для решения задачи нестационарной теплопроводности, приведенной в разделе 3.3 необходимо задать ряд параметров, конкретизирующих тепловой режим работы стенок- бойков. Одни из параметров, как правило, заданы (например, размеры бойков, скорость их движения, цикл обжатия) или же берутся из справочной литературы (такие, как теплофизические свойства материала стенки-бойка). Другие параметры определяются по эмпирическим формулам, полученным на основе экспериментальных зависимостей (например, коэффициент теплообмена на границе стенки-бойка с водой или воздухом). Некоторые же параметры, такие как например, плотность теплового потока от металла очага деформации, действующий на рабочую поверхность во время рабочего хода, а также эффективный коэффициент теплоотдачи, принятый на рабочую поверхность во время паузы можно определить (и то приближенно) лишь путем численного моделирования процесса работы стенки-бойка с различными значениями параметров и сравнения этих результатов с экспериментальными данными. Таким образом, определение коэффициентов для определения температурного поля стенки-бойка является очень сложной задачей. К тому же, для исследуемого процесса работы стенок-бойков отсутствуют какие либо экспериментальные данные. Реальные температурные поля стенок-бойков (а следовательно, и

уровень возникающих в них напряжений) может быть определен в последующем при получении экспериментальных данных на действующем оборудовании.

3.5.1. Определим сначала значение плотности теплового потока от металла очага деформации, действующий на рабочую поверхность во время рабочего хода (q). Допустим, что схема нагружения стенки-бойка близка к схеме нагружения штампа при ковке и горячей штамповке.

Согласно [61] Теплообмен штампа (в нашем случае – стенки-бойка) с горячей заготовкой имеет много общего с теплообменом при горячей прокатке.

Тогда согласно [61] среднюю плотность теплового потока на участке контакта стенки-бойка с заготовкой можно определить по формуле

$$q_{cp} = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{\tau_1} \sqrt{\lambda C_V} \frac{\theta_3 - \theta_0}{\sqrt{\pi \tau}} d\tau = \sqrt{\lambda C_V} \frac{2(\theta_3 - \theta_0)}{\sqrt{\pi \tau_1}}. \quad (3.8)$$

Для расчета в нашем случае принимаем следующие значения параметров, входящих в формулу:

$\lambda = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ - значение теплопроводности материала стенки-бойка;

$C_V = 5 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ - объёмная теплоёмкость — это количество теплоты, которое необходимо подвести к единице объёма вещества, чтобы нагреть его на единицу температуры. Значение для стали принято согласно [60];

$\theta_3 = 1000^\circ \text{C}$ - температура металла очага деформации;

$\theta_0 = 400^\circ \text{C}$ - температура рабочей поверхности стенки-бойка при рабочем ходе.

Время контакта стенки-бойка с металлом – 0,1364 секунды.

Подставляя принятые значения и переходя к единицам системы СИ получаем значение средней плотности теплового потока 25,9 МВт/(м²·К). В дальнейшем при расчетах принимаем не расчетное значение, а уменьшенное,

а именно $20 \text{ МВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Данное значение принято для вариантов расчета 1. Для варианта расчета 2 значение уменьшено в два раза.

3.5.2. Переходим к определению a_1 – эффективному коэффициенту теплоотдачи, принятого в граничных условиях на рабочую поверхность во время паузы.

Значение данного коэффициента подбирали многочисленными итерационными расчетами из условия, чтобы в квазистационарном состоянии температура рабочей поверхности стенки-бойка была на уровне $400 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате значение a_1 принято равным $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для вариантов расчета 1...3. Перечень вариантов дан в пункте 3.2.

Переходим к определению a_2 – коэффициенту теплоотдачи при охлаждении задней стенки, верха и низа стенки-бойка водой либо воздухом в зависимости от варианта расчета. Обозначение данного коэффициента принято одинаковым для охлаждения задней стенки, верха и низа стенки-бойка как водой, так и воздухом. Так для вариантов 1 и 2 этот коэффициент будет определен при охлаждении водой.

Однозначных данных для расчета коэффициента теплоотдачи a_2 при охлаждении стенки-бойка водой в литературе не существует. Но в работе [61] упоминается, что теплообмен штампа (в нашем случае – стенки-бойка) с горячей заготовкой имеет много общего с теплообменом при горячей прокатке. Поэтому попытаемся найти данные по этому коэффициенту для валков горячей прокатки, а найденное значение применим к бойку.

Так, например, в справочной литературе рассматриваются случаи поперечного омывания трубы потоком жидкости. При этом в расчетной практике используются различные способы расположения системы наружного охлаждения. Так, в [63] со ссылкой на различные источники приводятся значения α_2 : а) $198 \div 2300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C})$, б) $90 \div 1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C})$, в) $232 \div 1200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C})$. В работе [64] для роликов МНЛЗ диаметром 230мм принимается значение $\alpha_2 = 700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C})$. В работе [65] показано, как может

меняться коэффициент теплоотдачи α_2 по окружности валка, начиная с точки удара струи о валок, где $\alpha_2 \sim (3 \div 6) \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, заканчивая зонами, удаленными от точки удара на 25° , где $\alpha_2 \sim 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, при этом значение максимума зависит от скорости вылета струи. Заметим, что в указанных работах не указывается связь коэффициента α_2 с расходом воды. Однако в работе [66] указаны значения α_2 для валков диаметром 270 мм: при расходе 30-50 л/мин значения α_2 находятся в диапазоне $(1.9 \div 2.4) \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Также, в работе [67] даны данные, теоретических расчетов, которые согласно работы хорошо совпадают с экспериментальными значениями, величина α_2 меняется в пределах $300 \div 1600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. При этом не указаны параметры валка.

И, наконец, в работе [68] для коэффициента α_2 при охлаждении валков приводится значение, равное $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Поскольку для данного коэффициента имеется очень большой разброс, то в запас принимаем для охлаждения задней стенки, верха и низа стенки-бойка водой коэффициент α_2 , равный $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Вычислим значение α_2 при охлаждении задней стенки, верха и низа бойка воздухом. Величину коэффициента теплоотдачи α_2 охлаждения боковых поверхностей воздухом рассчитаем по формуле, приведенной в работе [62].

Согласно этой работе имеем:

$$\alpha_2 = \begin{cases} 120 \cdot (0.35 \cdot 10^{-3} T + 0.12) \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{град}, T \leq 400^\circ \text{С} \\ 120 \cdot (1.46 \cdot 10^{-3} T - 0.314) \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{град}, T \geq 400^\circ \text{С} \end{cases} \quad (3.9)$$

При температуре окружающего воздуха 60°С по приведенной формуле значение α_2 равно $17,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Для расчетов принимаем значение α_2 равным $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

3.6. Выводы

1. Разработан алгоритм определения температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб с использованием пакета ANSYS.

2. Для трех вариантов расчета температурных полей и термоупругих напряжений определены значения теплового потока и коэффициентов теплоотдачи.

4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕНКАХ-БОЙКАХ БЕЗ КАНАЛОВ УСТАНОВКИ ПРИ ОБЖАТИИ ЗАГОТОВКИ И НА ХОЛОСТОМ ХОДУ

4.1. Постановка задачи, исходные данные и граничные условия

Во второй главе даны результаты расчета напряженного состояния стенок-бойков без каналов сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации от усилия обжатия при получении листов из стали для сварных труб. Ниже приведены результаты расчета:

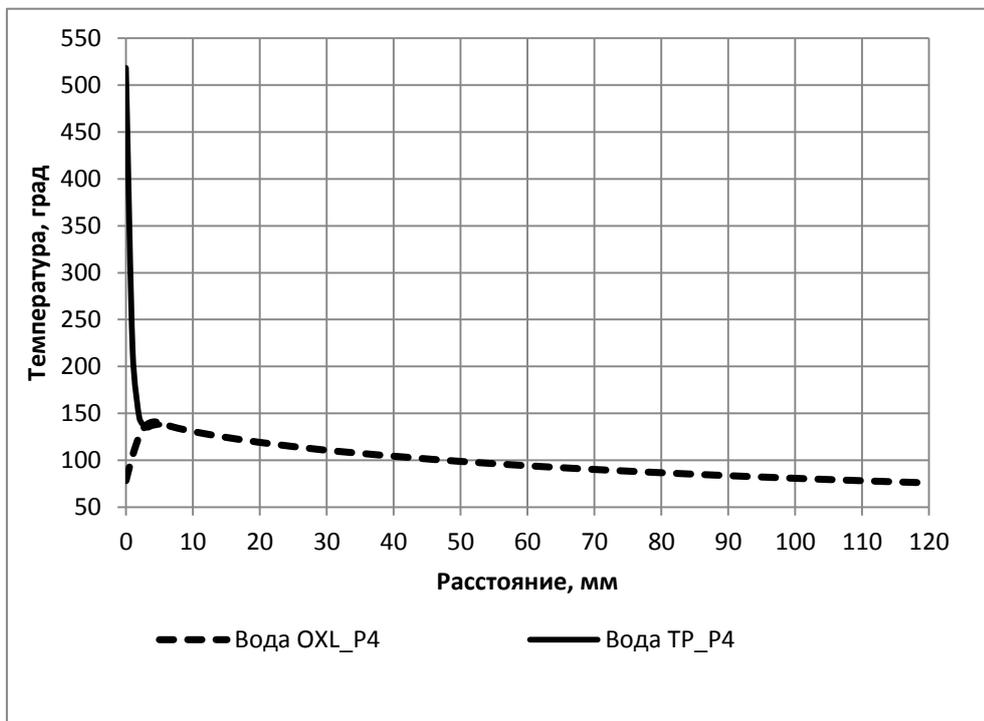
- температурного поля стенки-бойка без каналов при обжатии заготовки и во время холостого хода;
- термоупругого напряженного состояния стенки-бойка для найденных температурных полей без учета напряжений от усилия обжатия заготовки;
- напряженного состояния стенки-бойка без каналов от тепловой нагрузки и усилия обжатия.

Расчет температурного поля и напряженного состояния стенки-бойка выполнен для трех вариантов изложенных, в разделе 3.2.

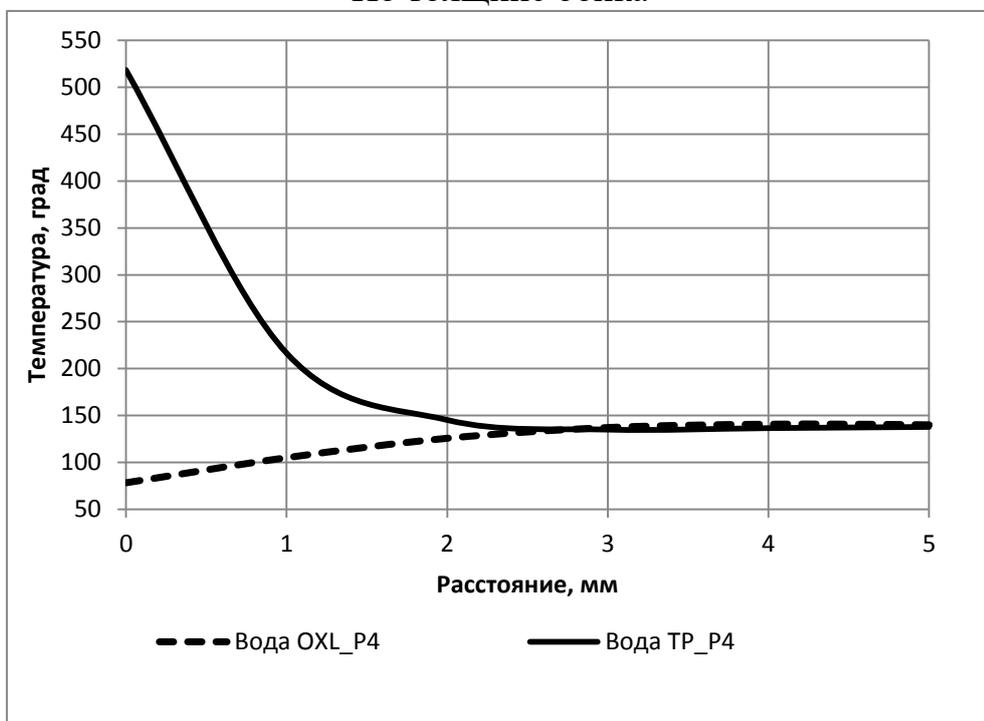
4.2. Результаты расчета температурных полей стенок-бойков без каналов (верхняя оценка)

На рисунках 4.1 – 4.2 показан характер распределения температуры по толщине и высоте стенки-бойка без каналов при охлаждении водой на холостом ходу в течение 0,4092 секунды и контакте с заготовкой при ее обжатии в течение 0,1364 секунды. Во время холостого хода осуществляется охлаждение водой стенки-бойка с боковых поверхностей и суппорта.

Температуры приведены на нескольких линиях, поскольку изменения температур по другим линиям подобно.

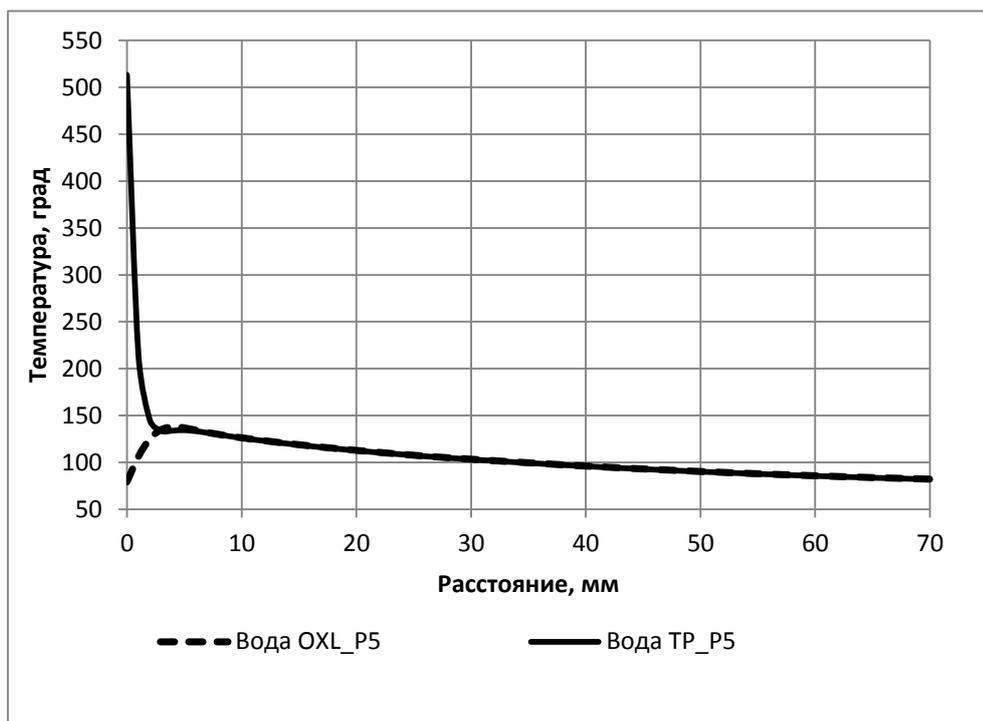


По толщине бойка

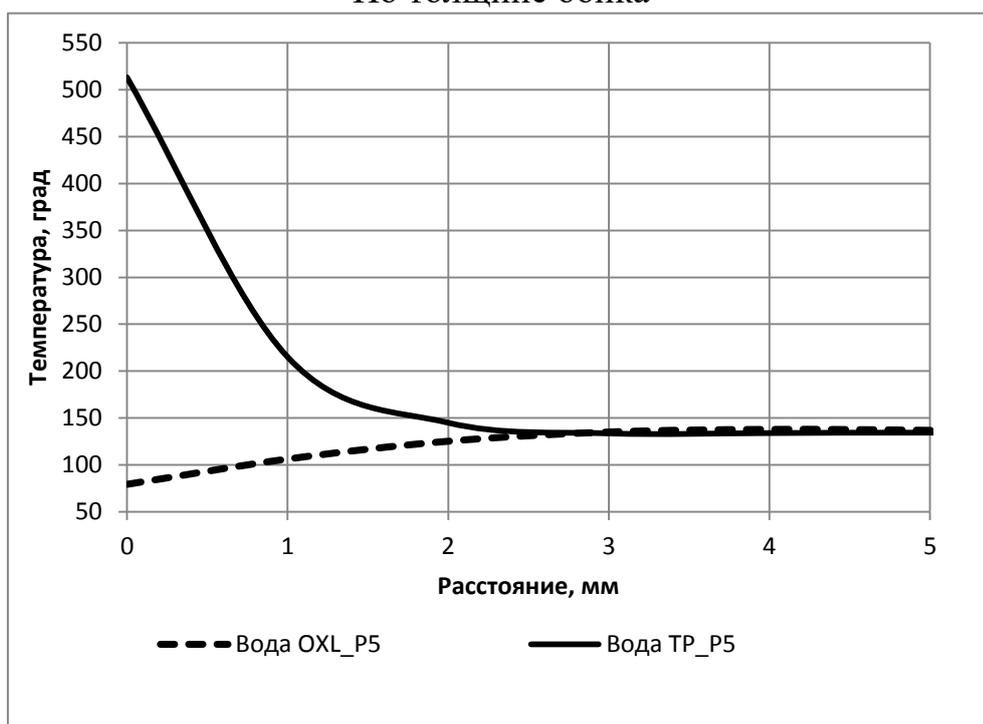


От поверхности контакта вглубь на 5мм

Рисунок 4.1 – Характер температур вдоль линии P_4 от воздействия на боек теплового потока (ТП) и охлаждения водой (ОХЛ). Вариант 1 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – водой



По толщине бойка



От поверхности контакта вглубь на 5мм

Рисунок 4.2 – Характер температур вдоль линии Р_5 от воздействия на боек теплового потока (ТП) и охлаждения водой (ОХЛ). Вариант 1 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – водой

Из приведенных результатов следует, что температурное поле стенки бойка во время обжата заготовки и холостого хода изменяется на глубине 2 – 3 мм. От воздействия теплового потока во время обжата заготовки контактная поверхность стенки-бойка нагревается до 510-535 °С и далее на холостом ходу при охлаждении его водой температура стенки-бойка на глубине 2-3 мм уменьшается до 135-150 °С. Температура стенки бойка по толщине уменьшается и на его задней поверхности составляет 75 – 100 °С. Следует отметить, что характер изменения температуры по ширине стенки-бойка практически не меняется и на боковой части стенки-бойка (рис. 4.2) он подобен изменению температуры по оси симметрии (рис. 4.1).

4.3 Напряженное состояние приконтактного слоя стенки-бойка без каналов от воздействия температурной нагрузки при обжате заготовки и при охлаждении водой на холостом ходу (верхняя оценка)

Для рассчитанных полей температур были определены величины осевых термоупругих напряжений (SX , SY и SZ) и эквивалентных напряжений по Мизесу ($SEQV$), возникающих в стенках-бойках без каналов при обжате заготовки и при охлаждении их водой во время холостого хода [24,53]. Результаты расчета осевых термоупругих напряжений и эквивалентных напряжений по Мизесу в приконтактном слое стенки-бойка без каналов приведены на рисунках 4.3 и 4.4 и в таблицах 4.1 и 4.2. Ниже на рисунках осевые напряжения возникающие в стенках бойках на холостом ходу обозначены «охл», а при обжате заготовки «тр».

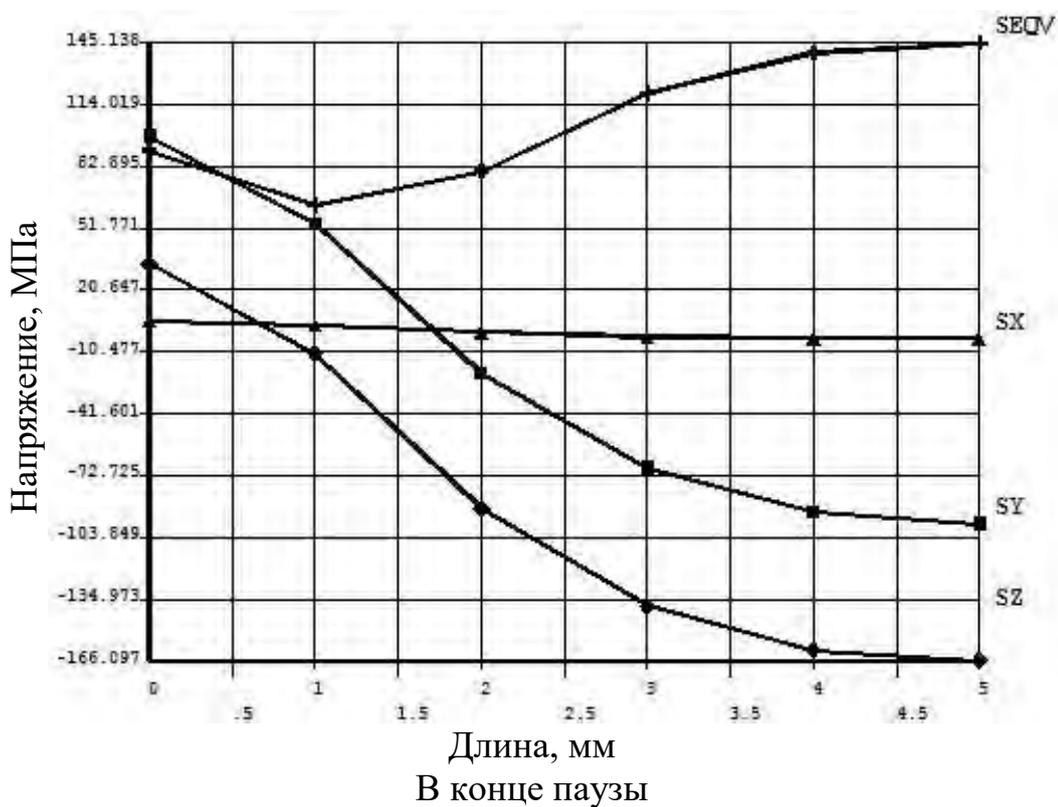
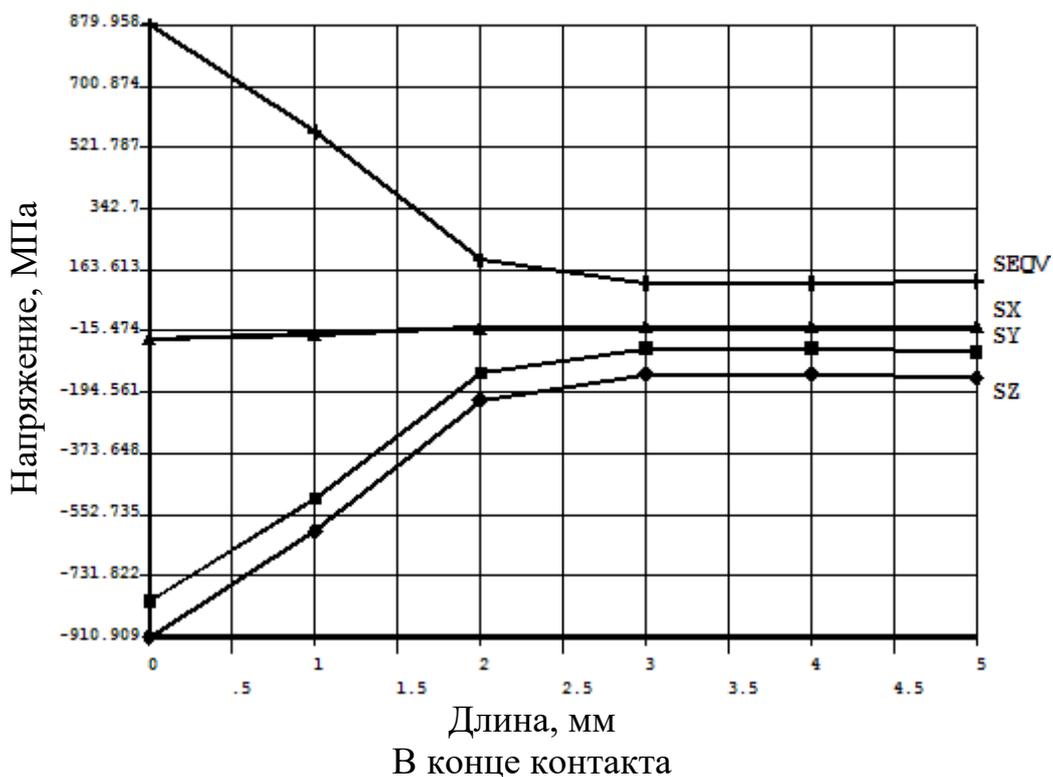


Рисунок 4.3– Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_2 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой

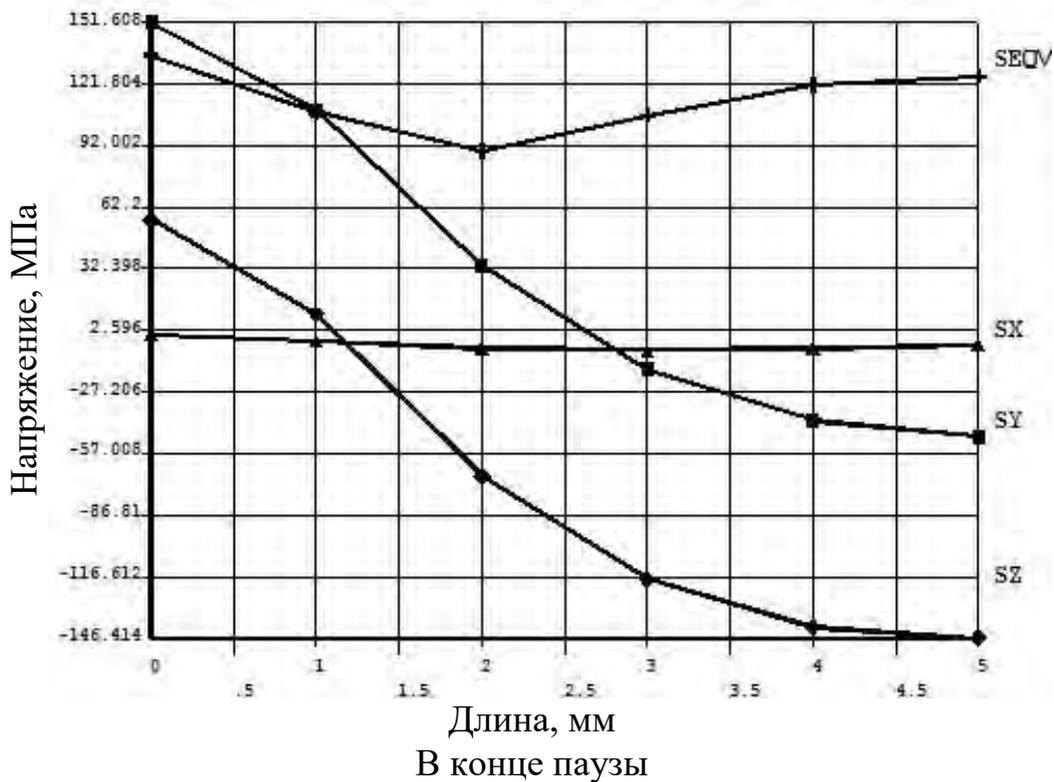
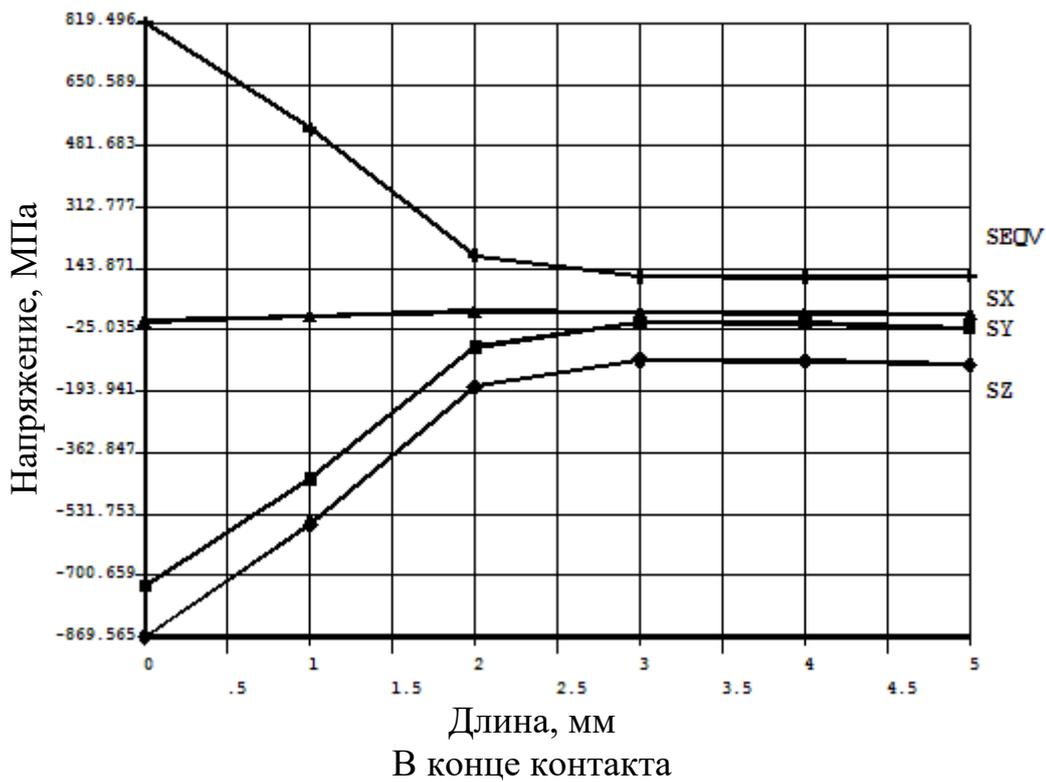


Рисунок 4.4 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_3 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой

Таблица 4.1 – Напряженное состояние приконтактного слоя стенки-бойка без каналов при обжати заготовки

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС
1, P1	-48	-78	-255	91	-742	-115	646	130
2, P2	-45	-15	-831	-105	-910	-140	880	128
4, P3	-25	15	-730	-25	-870	-115	820	120
5, P4	-20	-30	-240	89	-702	-108	617	130
1, P5	-43	-40	-195	100	-648	-85	561	78
2, P6	-40	6	-790	-35	-790	6	803	105
4, P7	2	2	-740	0	-740	6	744	2
5, P8	-9	-74	-230	10	-607	-10	528	75

*КП – Контактная поверхность стенки бойка с заготовкой

*ПС – Приконтактный слой стенки-бойка глубиной 5 мм

Таблица 4.2 – Напряженное состояние приконтактного слоя стенки-бойка без каналов в конце холостого хода

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС
1, P1	5	28	44	-10	10	-120	52	124
2, P2	-5	-8	88	-85	35	-166	90	145
4, P3	0	-8	151	-40	55	-146	136	120
5, P4	2	26	37	-9	30	-90	38	110
1, P5	6	26	45	-12	92	-37	82	60
2, P6	3	-2	107	-87	156	-50	143	80
4, P7	0	-5	148	-48	168	-44	160	40
5, P8	1	28	39	-10	117	-20	103	45

Эти данные характеризуют закономерности распределения осевых термоупругих и эквивалентных напряжений как по толщине приконтактного слоя, так и по высоте и ширине стенки-бойка без каналов при обжати заготовки и на холостом ходу. Представленные результаты свидетельствуют о том, что в зоне контакта стенки-бойка с заготовкой от воздействия температурной нагрузки в приконтактном слое стенки-бойка возникают сжимающие напряжения, имеющие максимальные значения на контактной поверхности. Затем сжимающие термоупругие напряжения снижаются и достигают минимальных значений на глубине приконтактного слоя равного 2

мм (рисунки 4.3 и 4.4, таблица 4.1). Максимальные термоупругие напряжения возникают вдоль осей Y и Z и достигают величин минус 740-910 МПа. Затем по толщине приконтактного слоя эти напряжения снижаются и на глубине 2 мм они становятся равными минус 108-140 МПа. Напряжение по Мизесу по высоте стенки бойка без каналов распределяется неравномерно и изменяется в диапазоне 528-880 МПа.

Так же важно оценить закономерности распределения осевых термоупругих напряжений в приконтактном слое стенок-бойков без каналов при охлаждении их водой на холостом ходу. Из рисунков 4.3 и 4.4 и таблицы 4.2 видно, что термоупругие напряжения распределяются по толщине приконтактного слоя стенок-бойков крайне неравномерно и имеют место как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Наибольшие растягивающие напряжения величиной до 168 МПа возникает в направлении осей Y и Z на контактной поверхности стенки-бойка с заготовкой, затем по толщине стенки-бойка они переходят в сжимающие (таблица 4.2).

4.4 Распределение осевых термоупругих напряжений по толщине и высоте стенки-бойка при обжати заготовки и на холостом ходу при охлаждении водой

Результаты расчета осевых термоупругих напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора приведены на рисунках 4.5 и 4.6 и в таблицах 4.3 и 4.4.

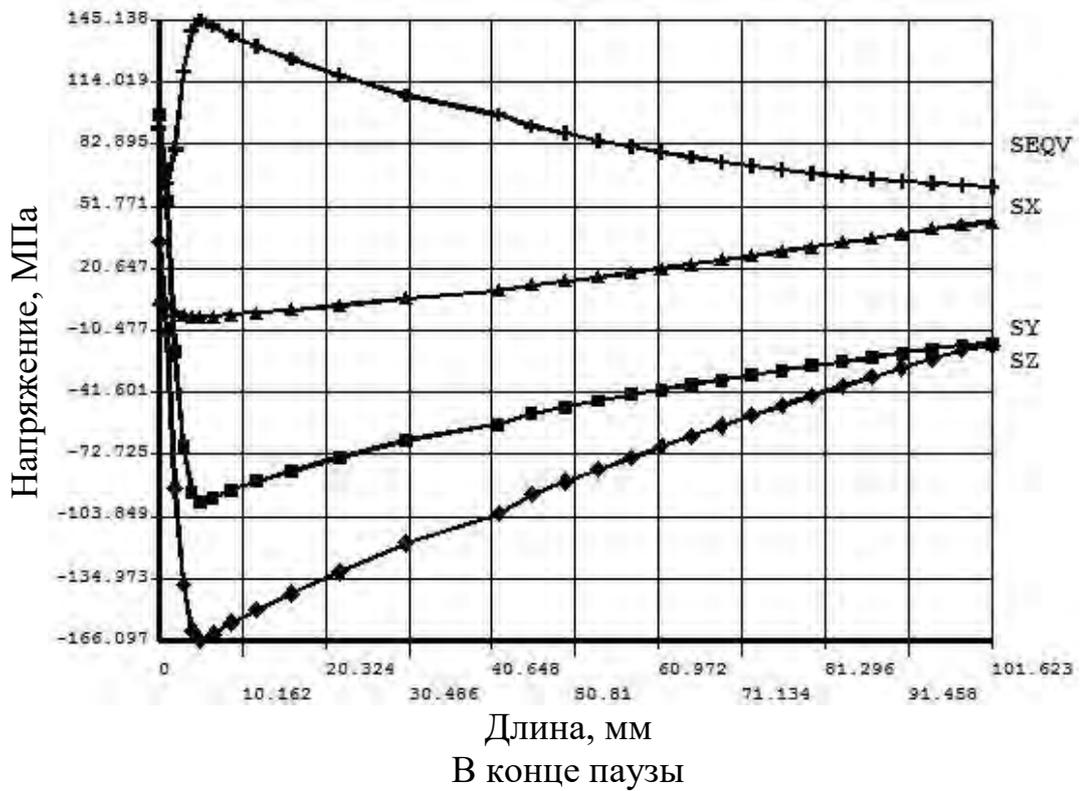
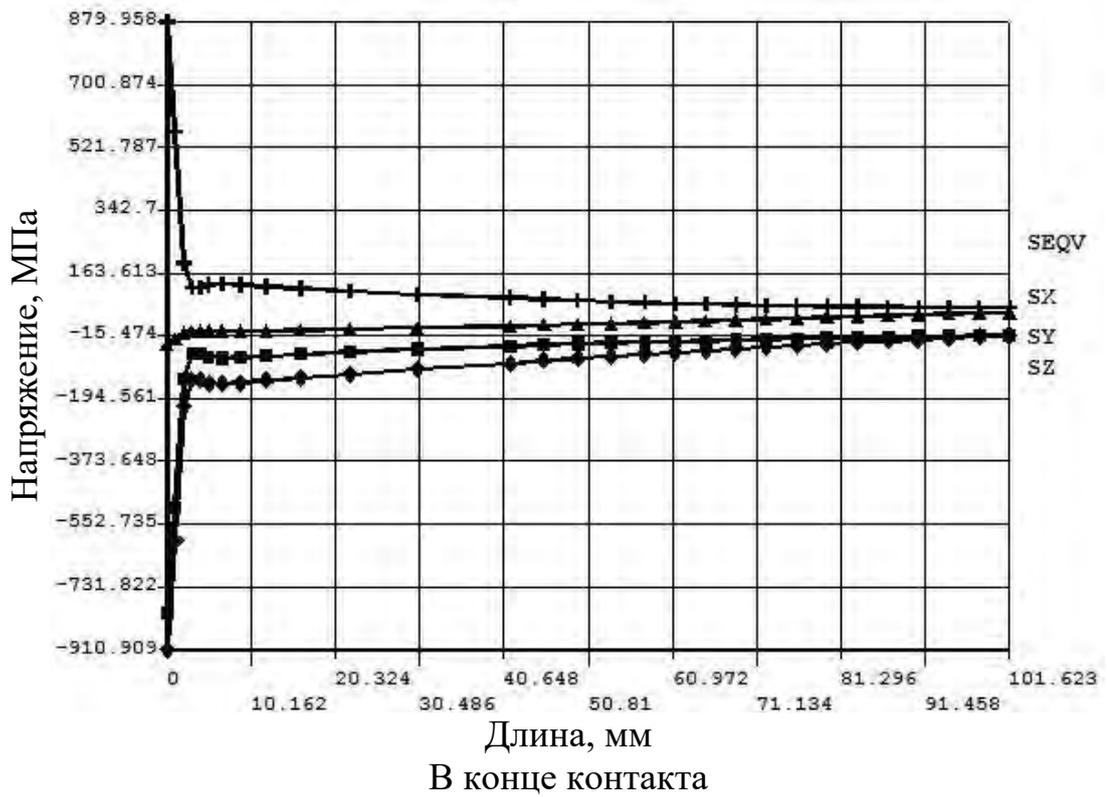


Рисунок 4.5 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_2 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой

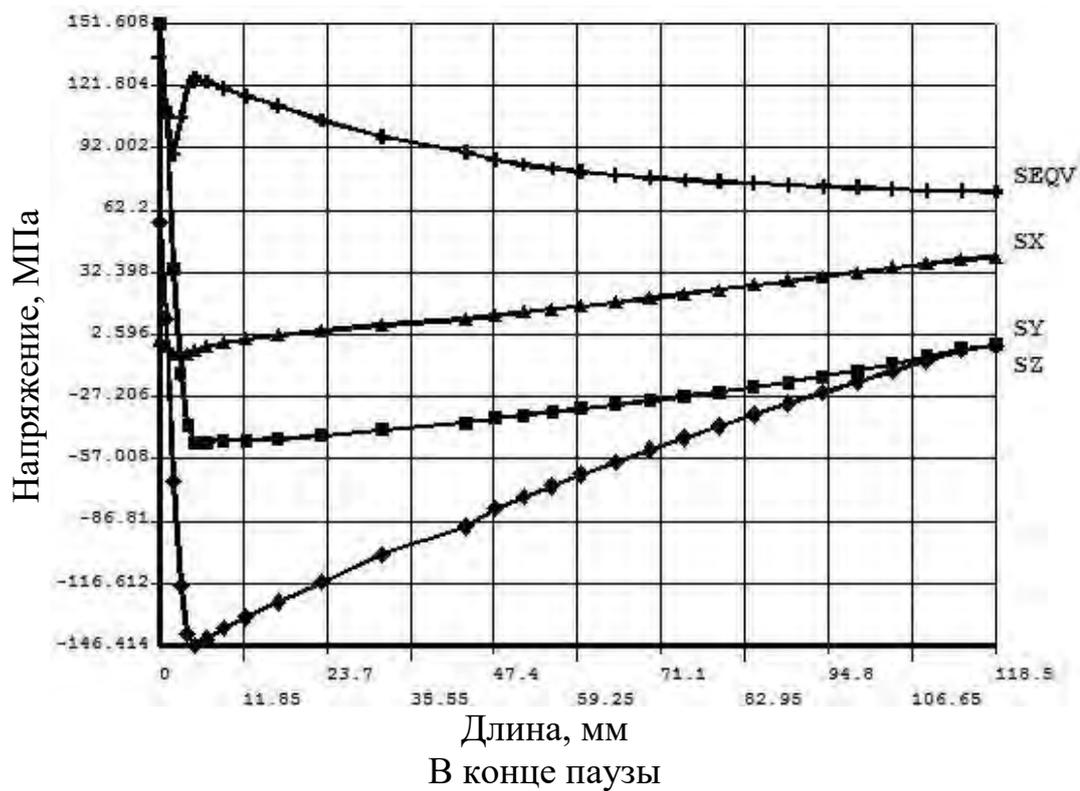
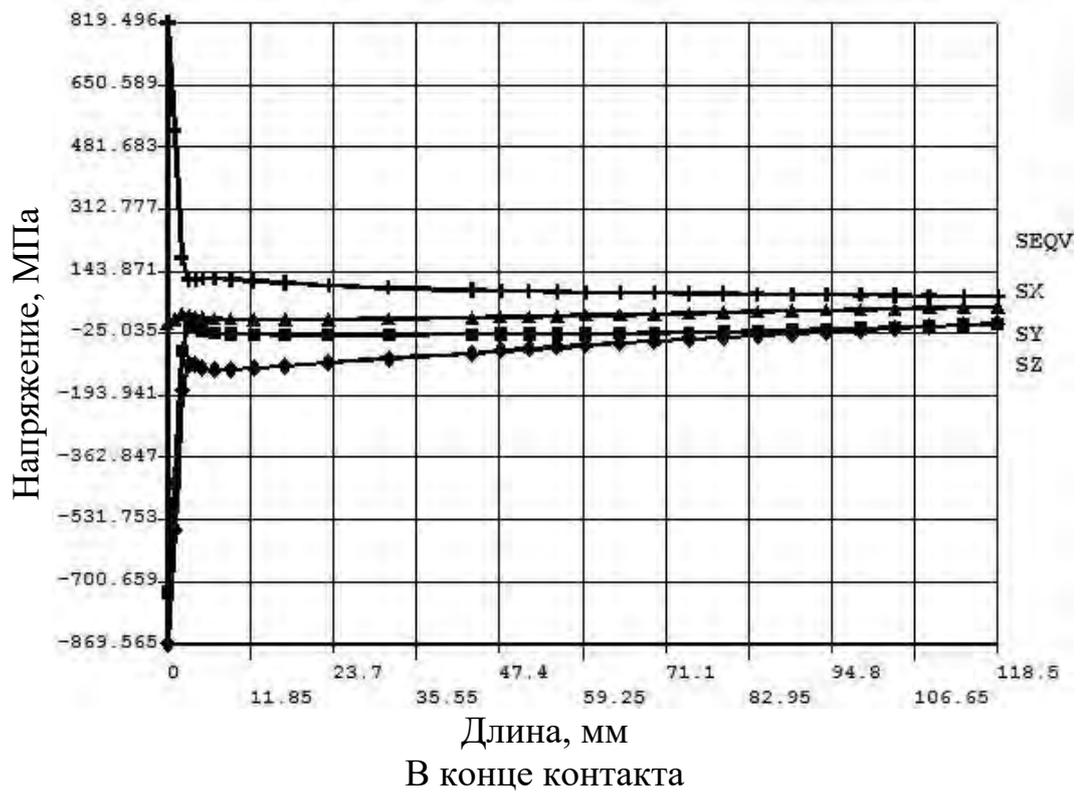


Рисунок 4.6– Характер термоупругих напряжений вдоль линий Р_3 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой

Таблица 4.3 – Распределение осевых термоупругих напряжений по толщине стенки-бойка без каналов при обжатии заготовки

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС
1, P1	-50	-300	-260	-50	-740	-170	650	230
2, P2	-45	45	-830	-15	-910	-15	880	70
4, P3	-25	60	-730	10	-870	-25	820	60
5, P4	-20	-174	-195	-20	-700	-42	617	154
1, P5	-40	-220	-220	43	-648	-50	561	198
2, P6	-40	6	-790	6	-790	6	803	86
4, P7	2	2	-740	2	-740	2	744	76
5, P8	-10	-160	-230	-46	-607	-39	528	158

Таблица 4.4 – Распределение осевых термоупругих напряжений по толщине стенки-бойка без каналов в конце холостого хода

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС
1, P1	5	-260	28/-19	-88	0	-116/-87	124	220
2, P2	0	41	98/-93	17	34/-166	-17	145	61
4, P3	-8	40	151/-50	-4	78/-146	-17	121	72
5, P4	22	-163	37/-8	-15	22/-100	-45	125	146
1, P5	30	-192	48	-40	92/-40	-60	60	187
2, P6	0	30	107/-87	-2	85/-51	-2	83	85
4, P7	-4	16	148/-48	6	120/-40	6	16	82
5, P8	25	-143	45/-13	-7	117/-13	-18	45	146

Эти данные характеризуют распределение осевых и эквивалентных напряжений по толщине и высоте стенки-бойка при воздействии температурной нагрузки и при охлаждении его водой и на холостом ходу. Эти данные свидетельствуют о том, что осевые термоупругие напряжения являются сжимающими и достигают на контактной поверхности стенки-бойка максимальных величин равных минус 700÷910 МПа в направлении осей Y и Z при обжатии заготовки. В отличие от осевых термоупругих напряжений от температурной нагрузки осевые термоупругие напряжения в стенках-бойках на холостом ходу распределяются по его толщине и высоте крайне неравномерно (рисунки 4.5 и 4.6, таблица 4.4). Наибольшее

сжимающие термоупругие напряжения в направлении оси Z возникают в приконтактном слое стенки-бойка и достигают значений минус 100-166 МПа. Однако на контактной поверхности стенки бойка термоупругие напряжения в направлении осей Y и Z растягивающие и достигающие значений 100÷151 МПа.

4.5 Распределение осевых термоупругих напряжений в приконтактном слое и по высоте стенки-бойка без каналов при обжати заготовки и на холостом ходу

Так же важно оценить закономерности распределения осевых термоупругих напряжений в приконтактном слое и по высоте стенки-бойка без каналов при обжати заготовки и на холостом ходу (рисунки 4.7-4.10, таблицы 4.5 и 4.6).

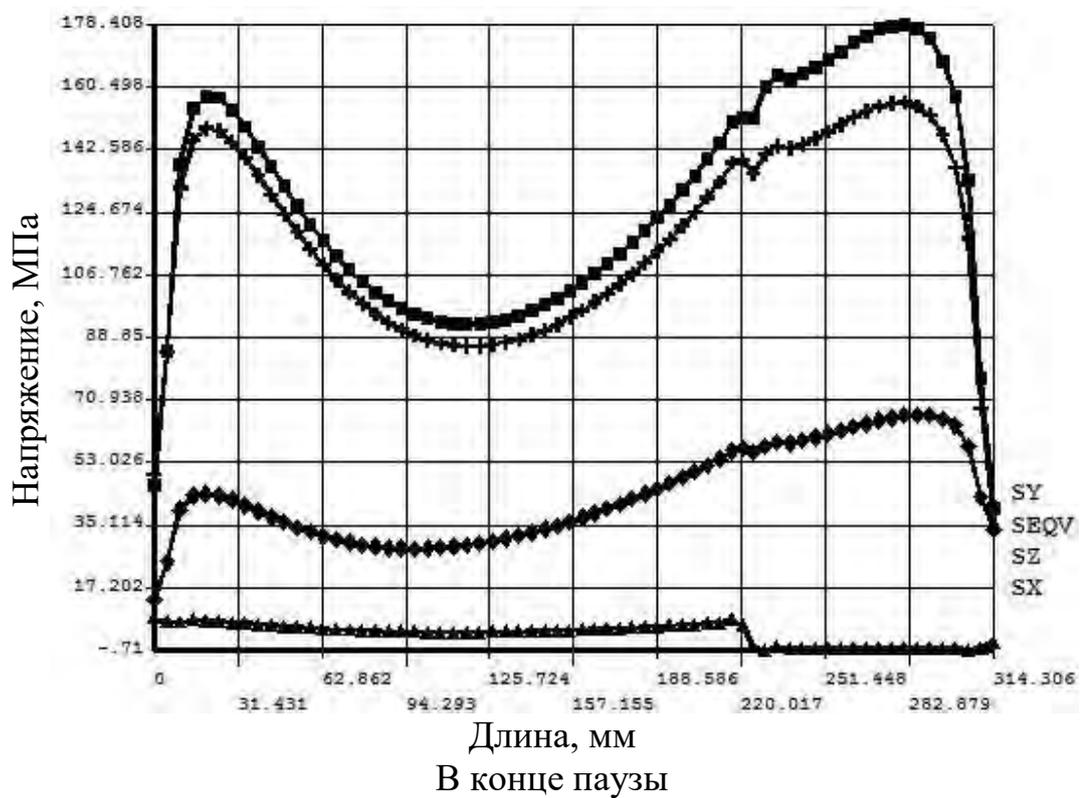
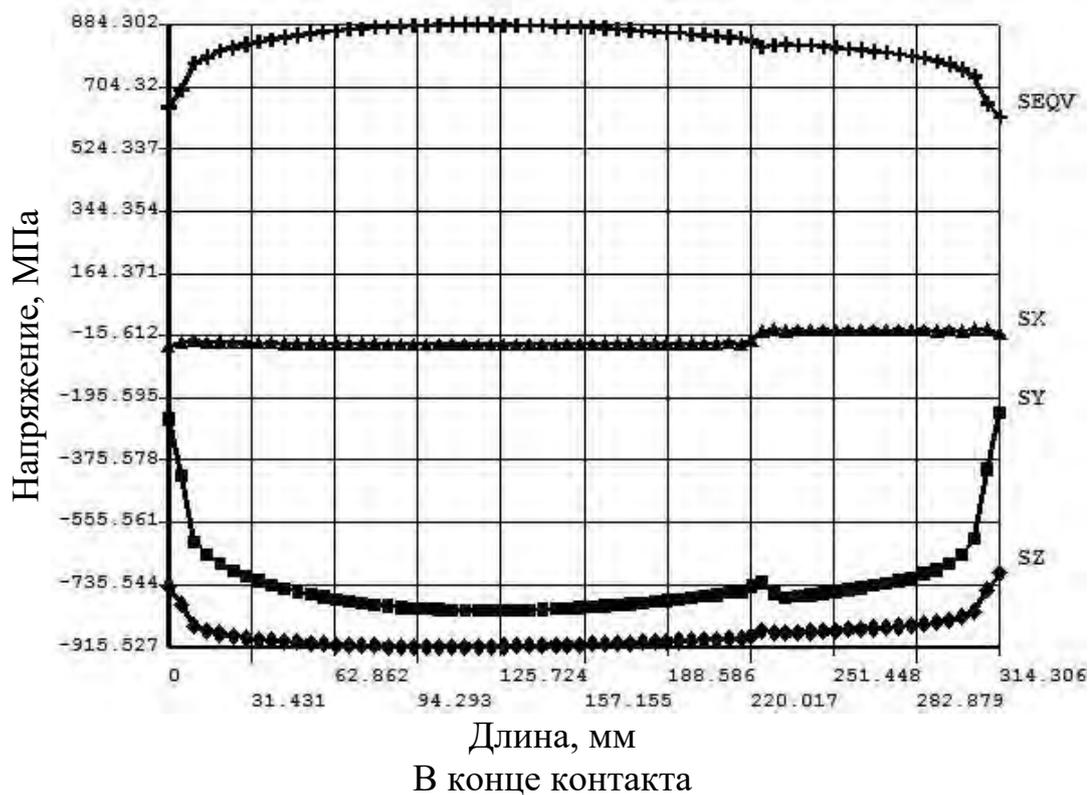


Рисунок 4.7 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий Р_9 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой

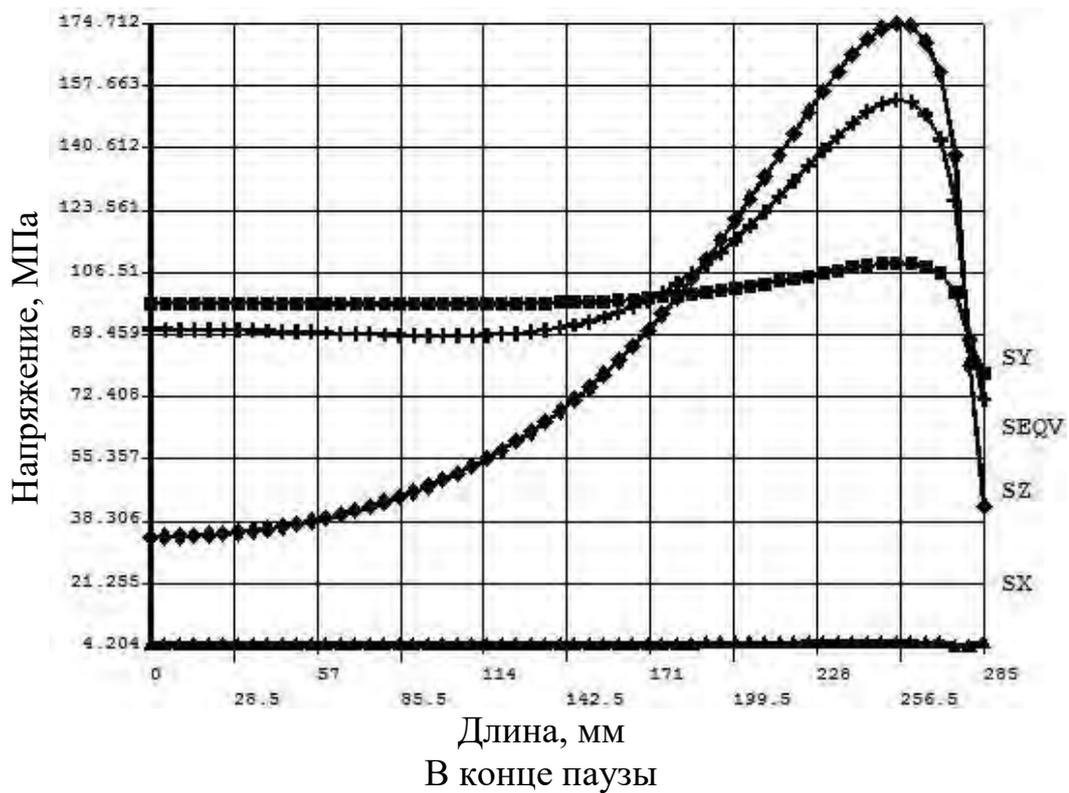
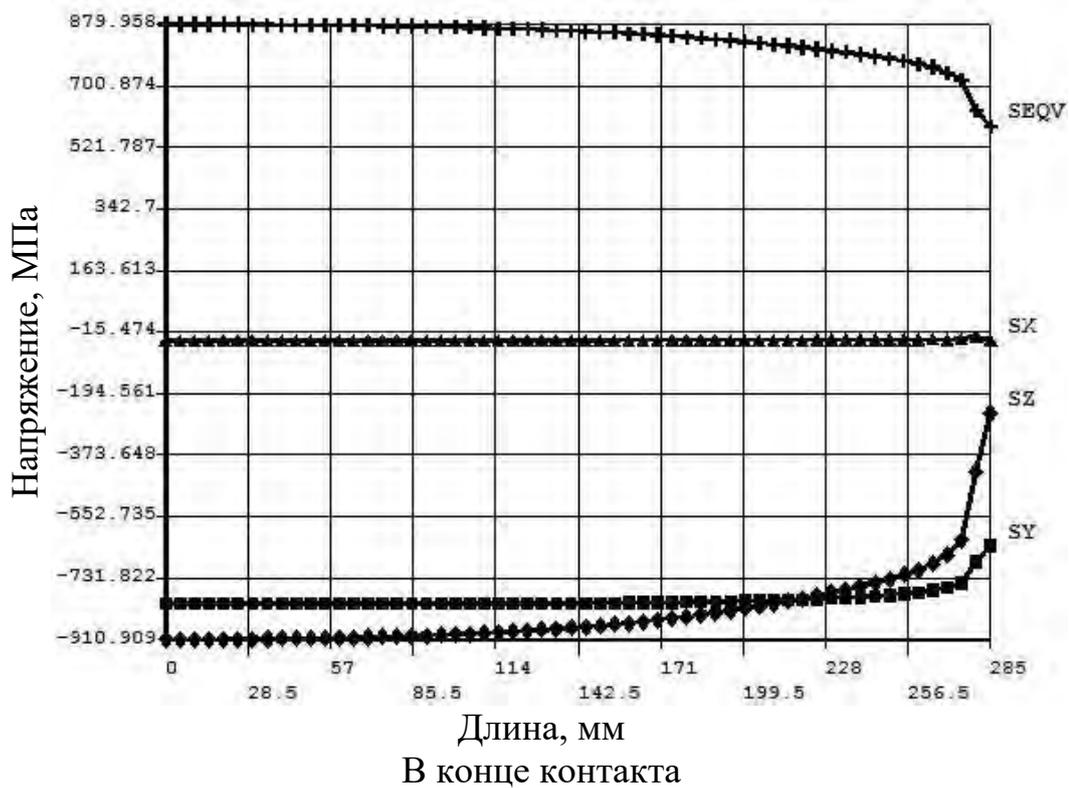


Рисунок 4.8 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_11 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой

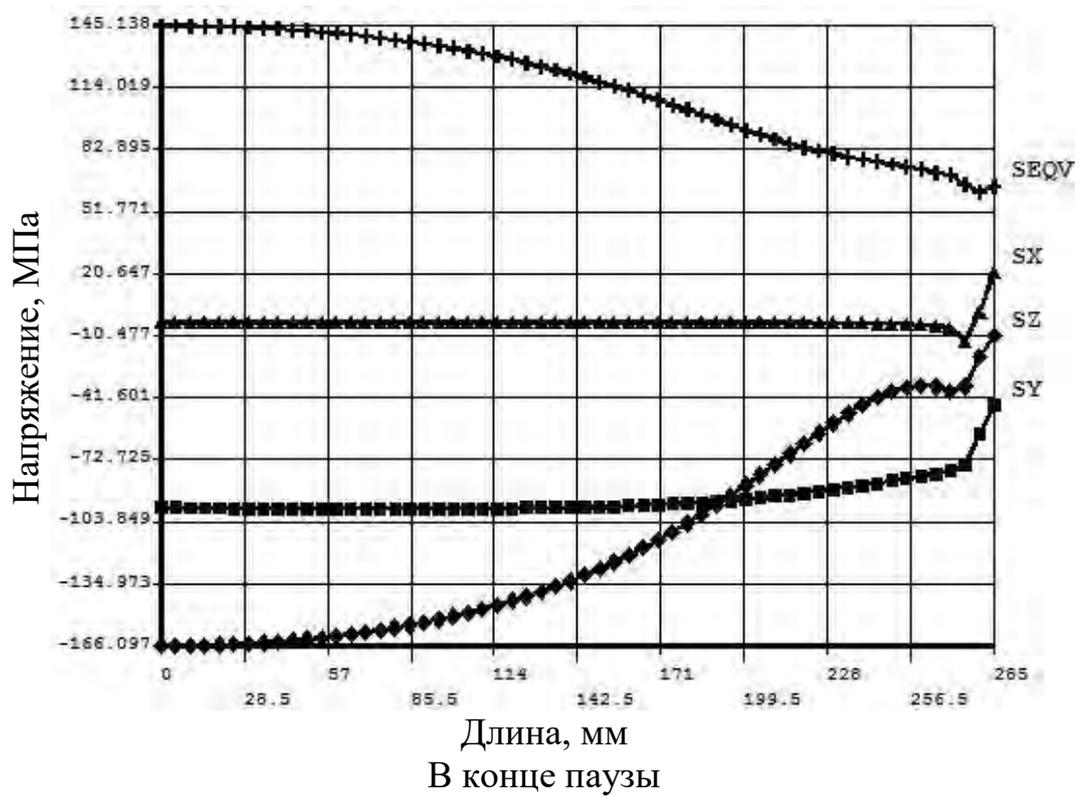
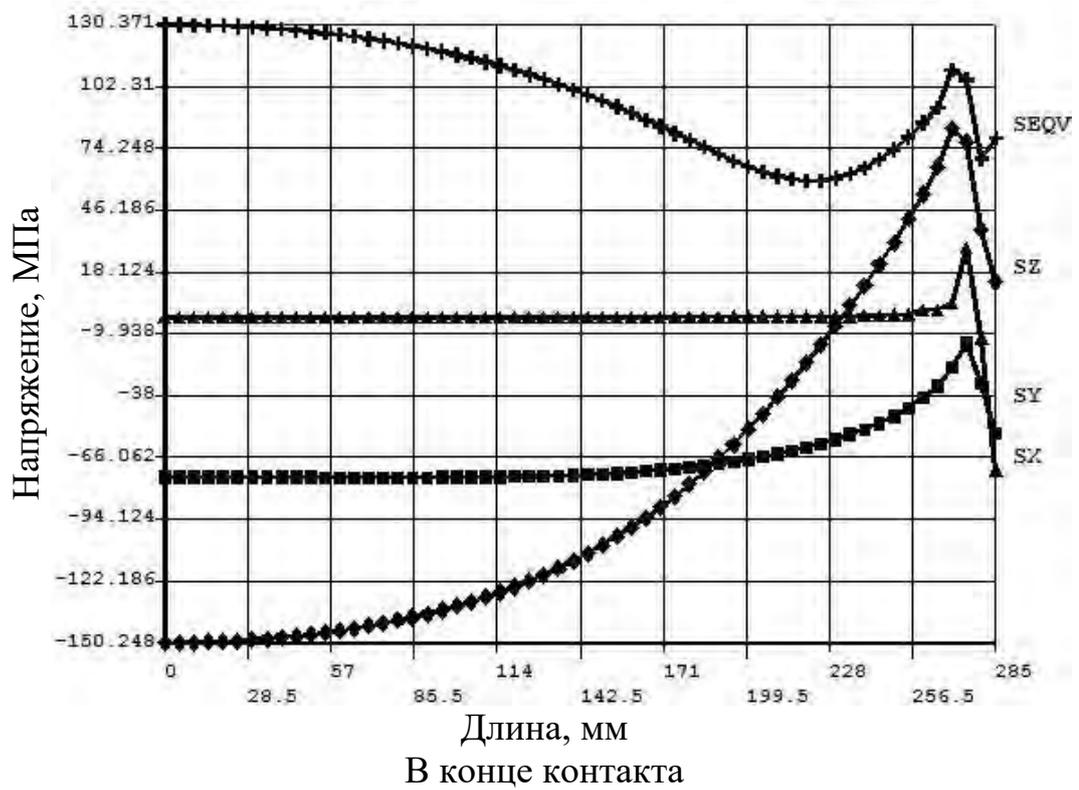


Рисунок 4.9 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_12 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой

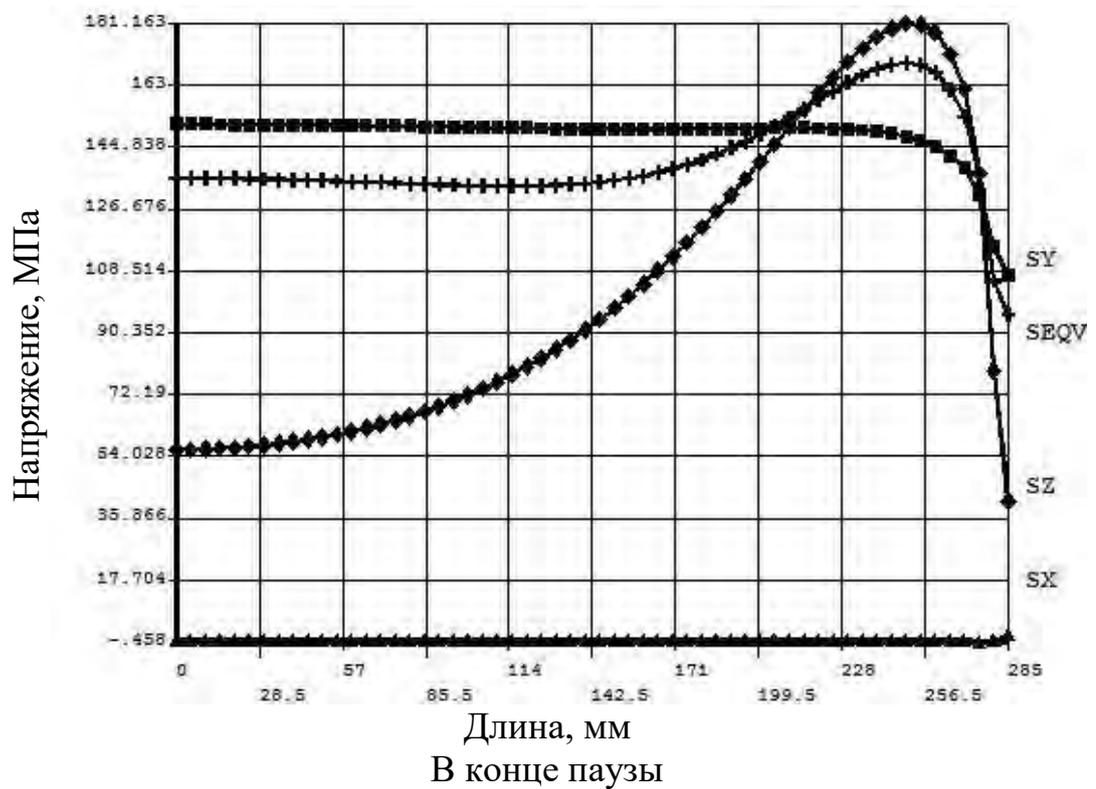
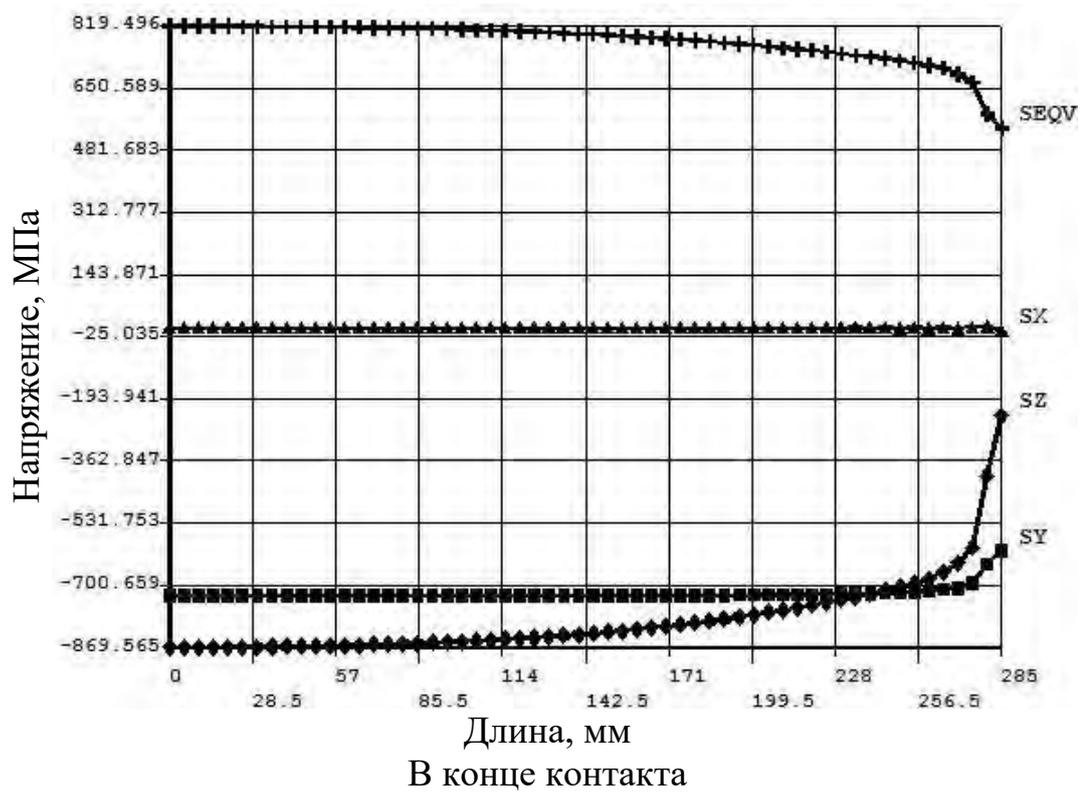


Рисунок 4.10 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_13 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой

Таблица 4.5 – Распределение осевых термоупругих напряжений по толщине приконтактного слоя, по высоте и ширине стенки-бойка без каналов при обжатию заготовки

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	OC	КС	OC	КС	OC	КС	OC	КС
линия P9	-40	-40	-285	-825	-735	-915	700	884
линия P10	-75	0	83	-75/83	-91	-154	163	131
2, P11	-50	-50	-810	-642	910	-250	879	580
2, P12	-7	-7	-75	-66	-150	84	130	110
4, P13	-30	-30	-730	-615	-869	-230	819	650
4, P14	14	14	-20	15	-120	83	124	84

*OC – по оси симметрии стенки-бойка

*КС – вертикальный край стенки-бойка

Таблица 4.6 – Распределение осевых термоупругих напряжений по толщине приконтактного слоя по высоте и ширине стенки-бойка без каналов на холостом ходу

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	OC	КС	OC	КС	OC	КС	OC	КС
линия P9	-31	-71	153	94/178	17	58	148	150
линия P10	-12	-12	-10	-90/-10	-106	-170/-90	120	149
2, P11	4	4	95	108	34	174	89	153
2, P12	-12	-12	-93	-41	-166	-41	148	66
4, P13	0	0	151	108	54	181	135	170
4, P14	-5	-5	-50	-20	-146	-10	125	44

*OC – по оси симметрии стенки-бойка

*КС – вертикальный край стенки-бойка

Максимальные значения термоупругих напряжений по оси Y и Z , соответственно равные минус 825 МПа и минус 915 МПа, распределяются по высоте контактной поверхности стенки-бойка практически равномерно (рисунок 4.7, таблица 4.5). Однако на холостом ходу эти напряжения становятся растягивающими и в направлении оси Y достигают величины 153 МПа, а в направлении оси Z – 58 МПа. Следует отметить что в приконтактном слое по высоте стенки-бойка термоупругие напряжения в направлении оси Y при обжатию заготовки распределяются неравномерно: от растягивающих, величиной 83 МПа, переходят в сжимающие, величиной

минус 75 МПа. С другой стороны термоупругие напряжения на контактной поверхности стенки-бойка в направлении оси Z являются сжимающими и изменяются по высоте от минус 91 до минус 154 МПа (таблица 4.5).

На холостом ходу термоупругие напряжения в направлении осей Y и Z в приконтактном слое являются сжимающими и достигают соответственно значений минус 106 и минус 170 МПа (таблица 4.6).

Рисунки 4.8 и 4.9 характеризуют распределение осевых термоупругих напряжений в приконтактном слое стенки-бойка по его ширине при обжати заготовки и на холостом ходу. При обжати заготовки напряжения в направлении осей Y и Z сжимающие и имеют максимальные значения по оси симметрии стенки-бойка и соответственно равны минус 810 МПа и минус 910 МПа. Однако на холостом ходу эти термоупругие напряжения переходят в растягивающие, причем напряжение в направлении оси Z достигает величины 174 МПа (рисунок 4.8, таблица 4.5). Следует отметить, что при обжати заготовки и на холостом ходу термоупругие напряжения в приконтактном слое стенки-бойка сжимающие и распределяются по его ширине крайне неравномерно. Сжимающее напряжение в направлении оси Z на оси симметрии стенки-бойка при обжати заготовки, имеющее величину минус 150 МПа, переходит в зоне боковой поверхности стенки-бойка в растягивающее величиной 84 МПа.

На холостом ходу напряжения в направлении осей Y и Z в приконтактном слое сжимающие и достигают соответственно величин минус 93 МПа и минус 166 МПа (рисунок 4.9). Аналогичный характер распределения осевых термоупругих напряжений в приконтактном слое стенок-бойков наблюдается и сечении 4 при обжати заготовки и холостом ходу (рисунок 4.10, таблицы 4.5 и 4.6).

4.6. Напряженное состояние стенки-бойка без каналов от воздействия усилия обжатия и температурной нагрузки (верхняя оценка)

На рисунках 4.11 и 4.12 показаны закономерности распределения осевых суммарных напряжений в стенках- бойках от усилия обжатия и температурной нагрузки по толщине и высоте стенки-бойка без каналов. Представленные результаты свидетельствуют о том, что в зоне контакта стенки-бойка с заготовкой имеют место сжимающие напряжения, причем наибольшей величины они достигают на контактной поверхности, а затем по толщине стенки-бойка уменьшаются (рисунки 4.11, 4.12, таблицы 5.9, 5.10).

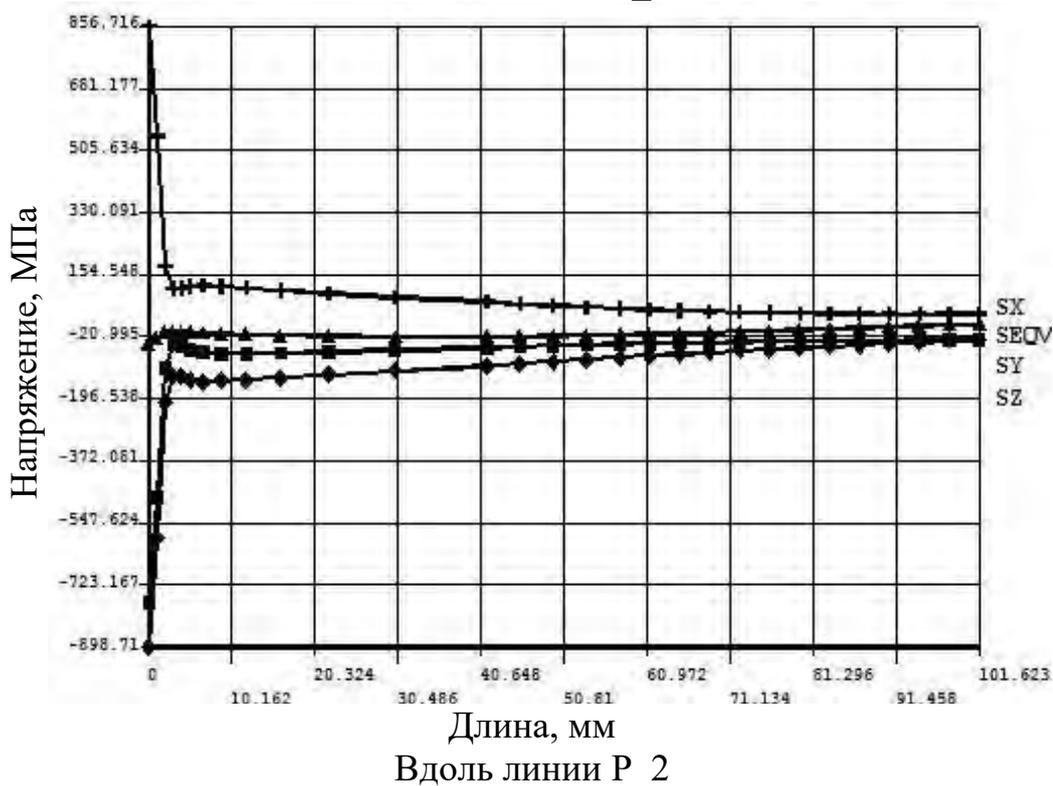
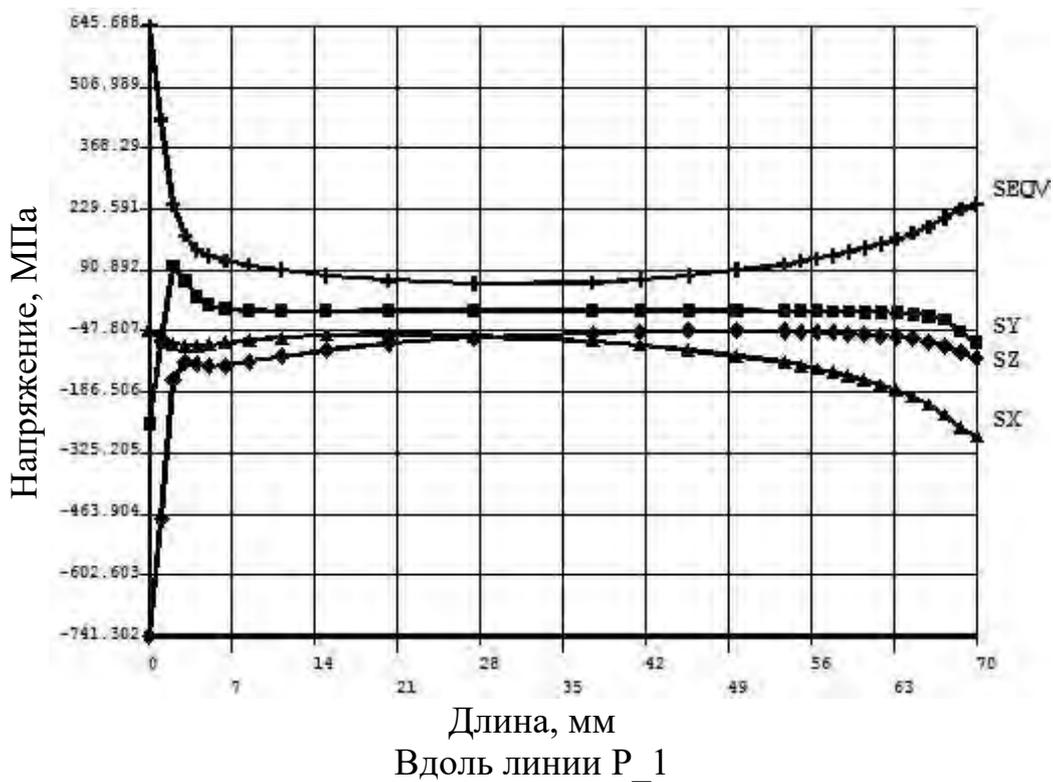


Рисунок 4.11– Характер суммарных напряжений вдоль линий P_1 и P_2 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 1 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – водой

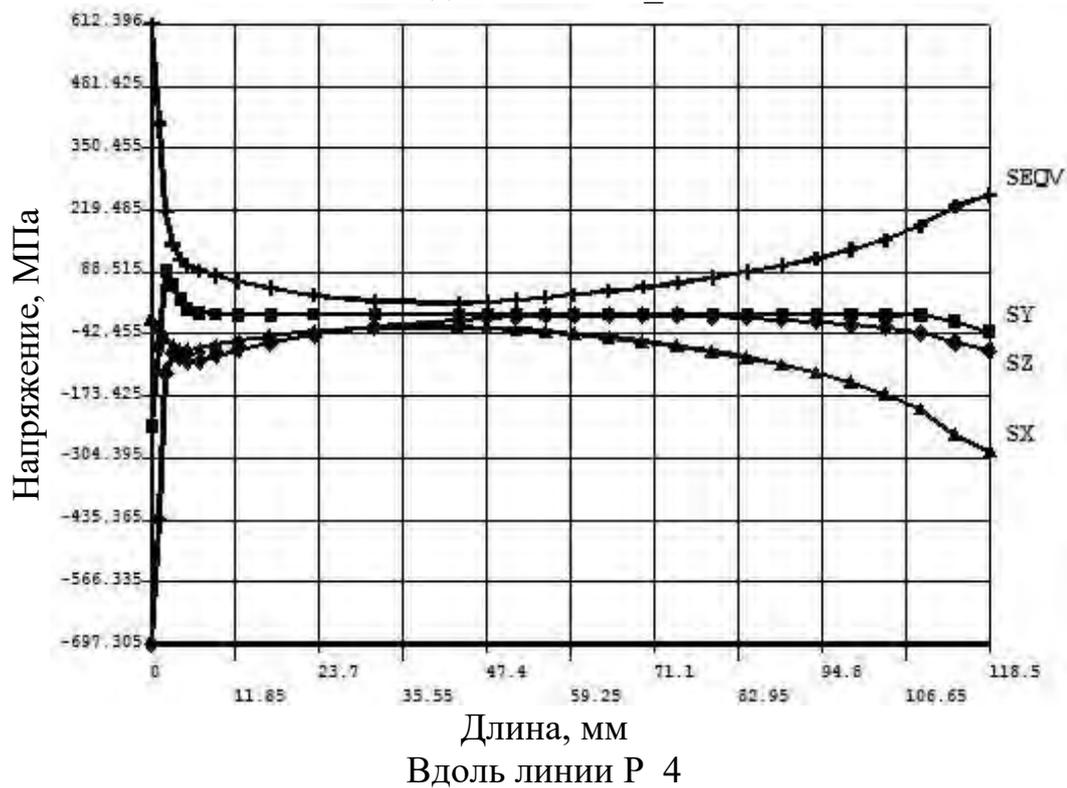
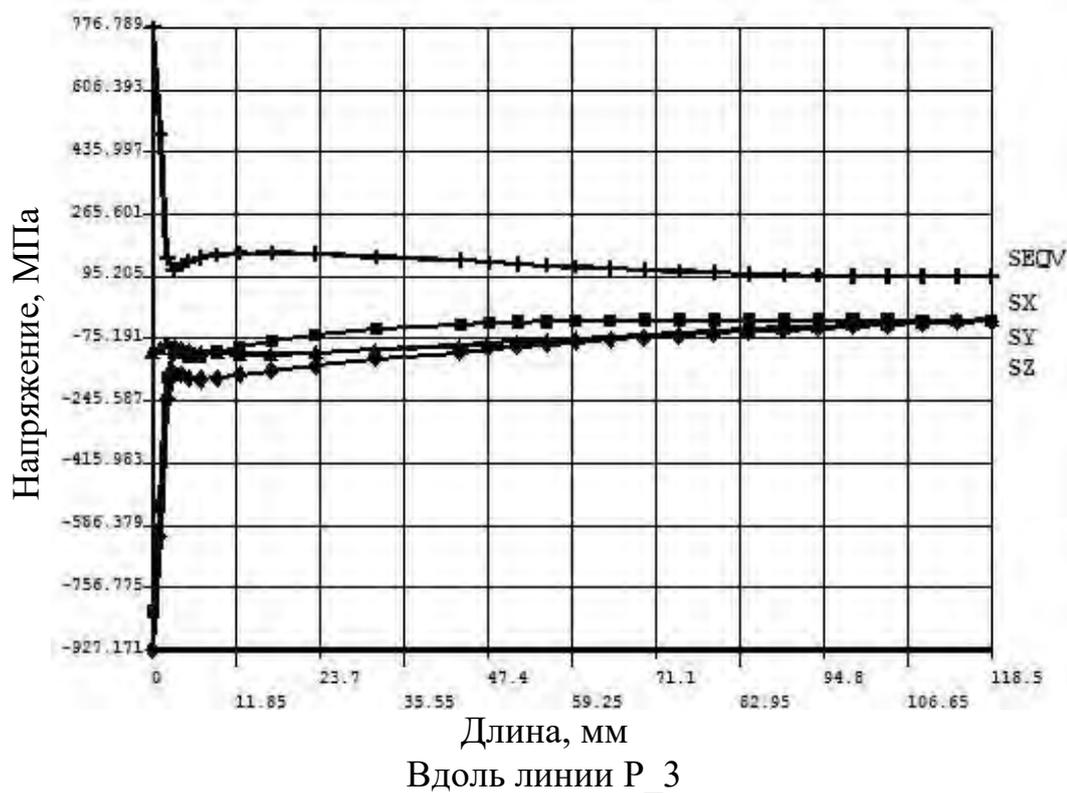


Рисунок 4.12 – Характер суммарных напряжений вдоль линий P_3 и P_4 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 1 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – водой

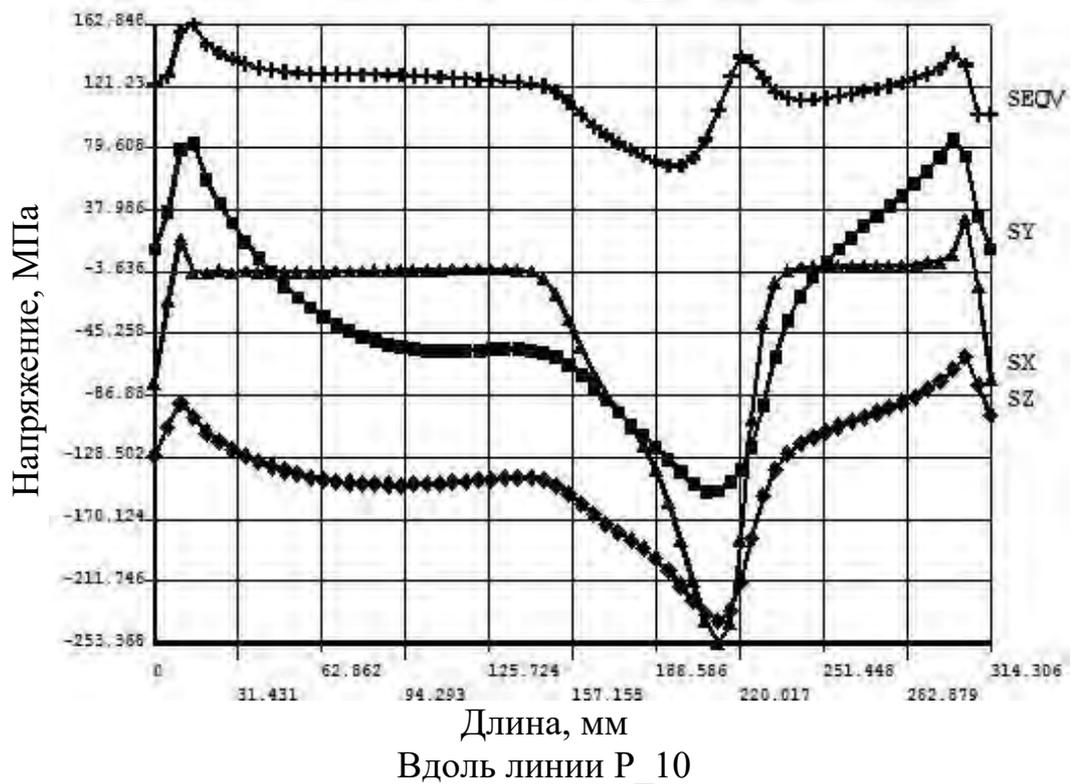
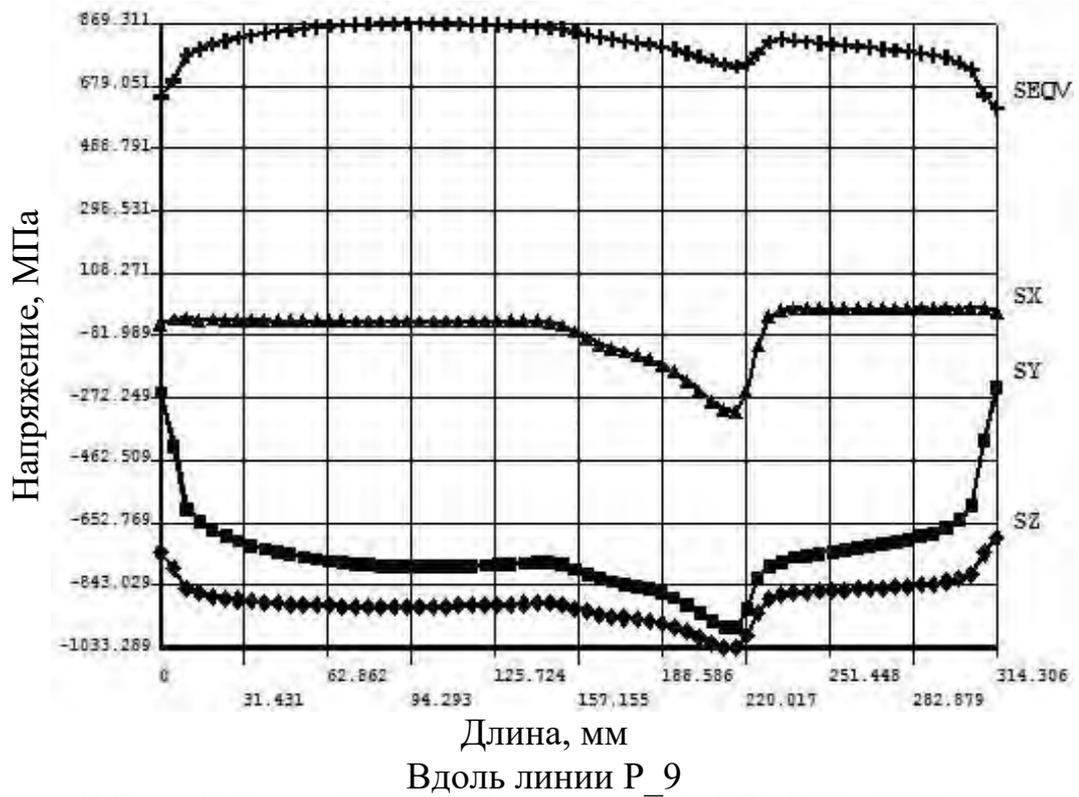


Рисунок 4.13 – Характер суммарных напряжений вдоль линий P_9 и P_10 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 1 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – водой

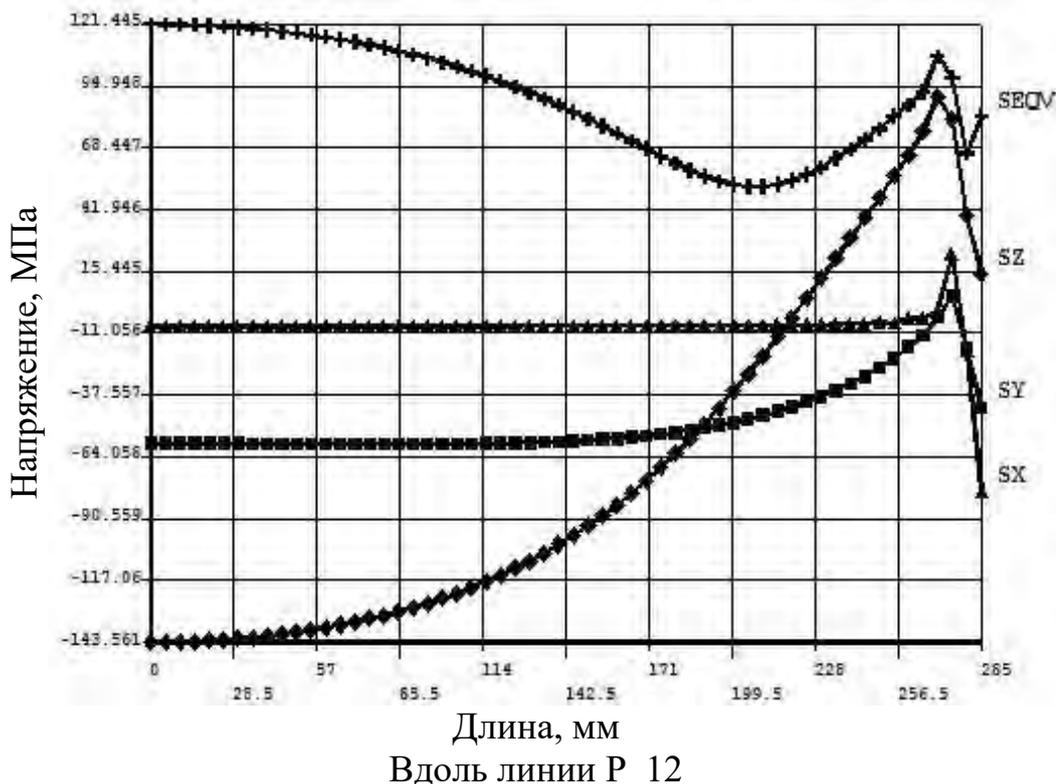
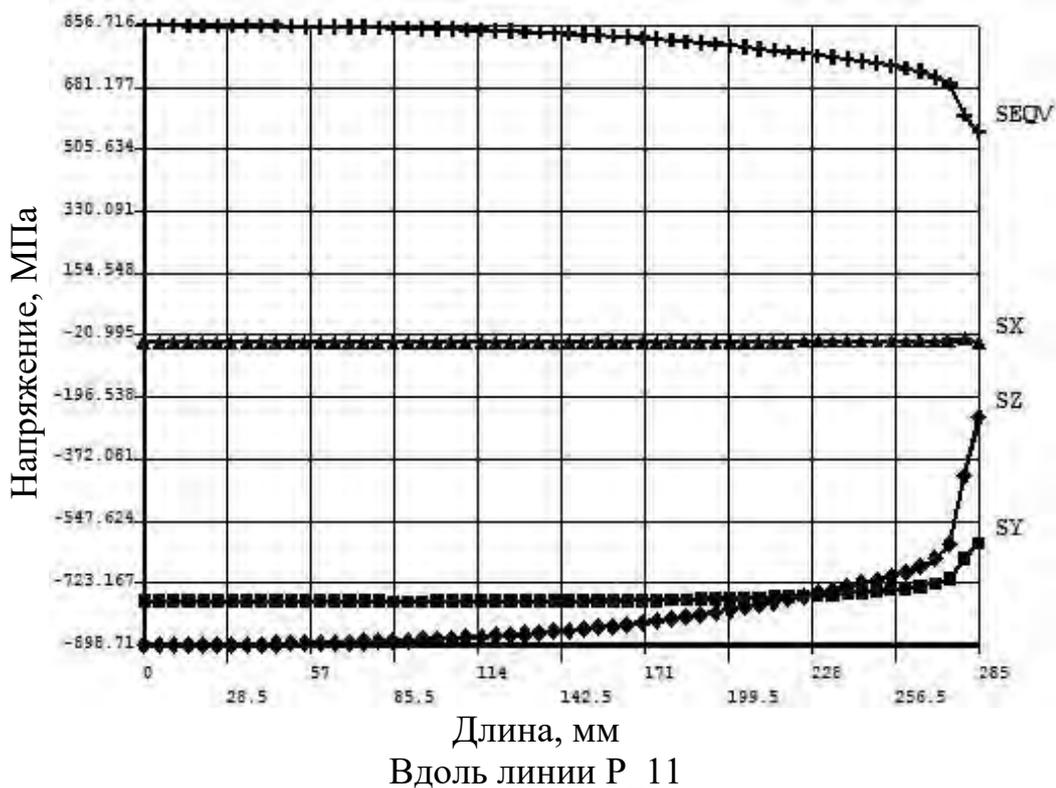


Рисунок 4.14 – Характер суммарных напряжений вдоль линий P_11 и P_12 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 1 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – водой

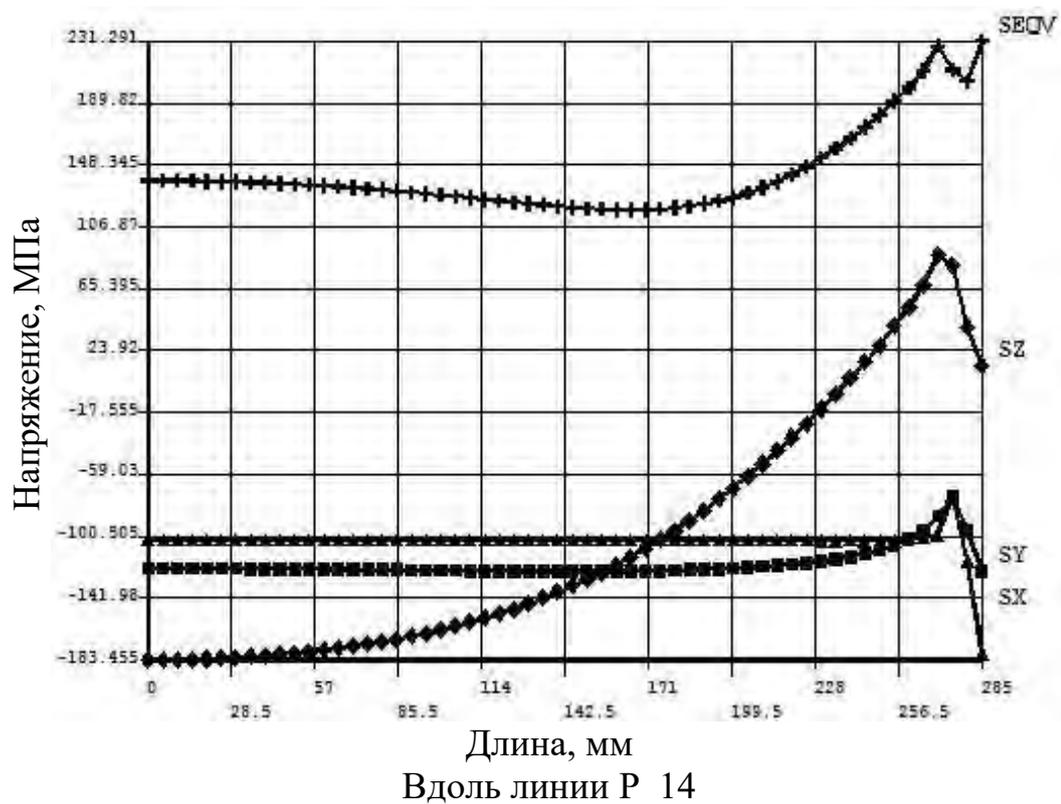
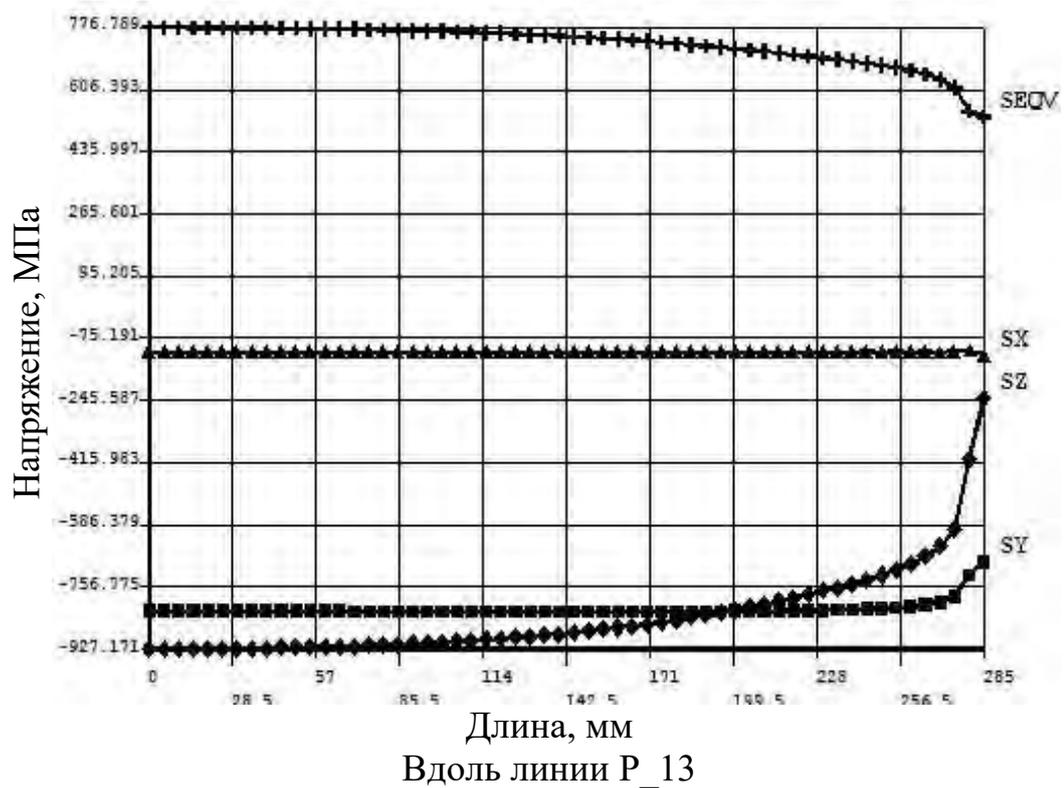


Рисунок 4.15 – Характер суммарных напряжений вдоль линий P_13 и P_14 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 1 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – водой

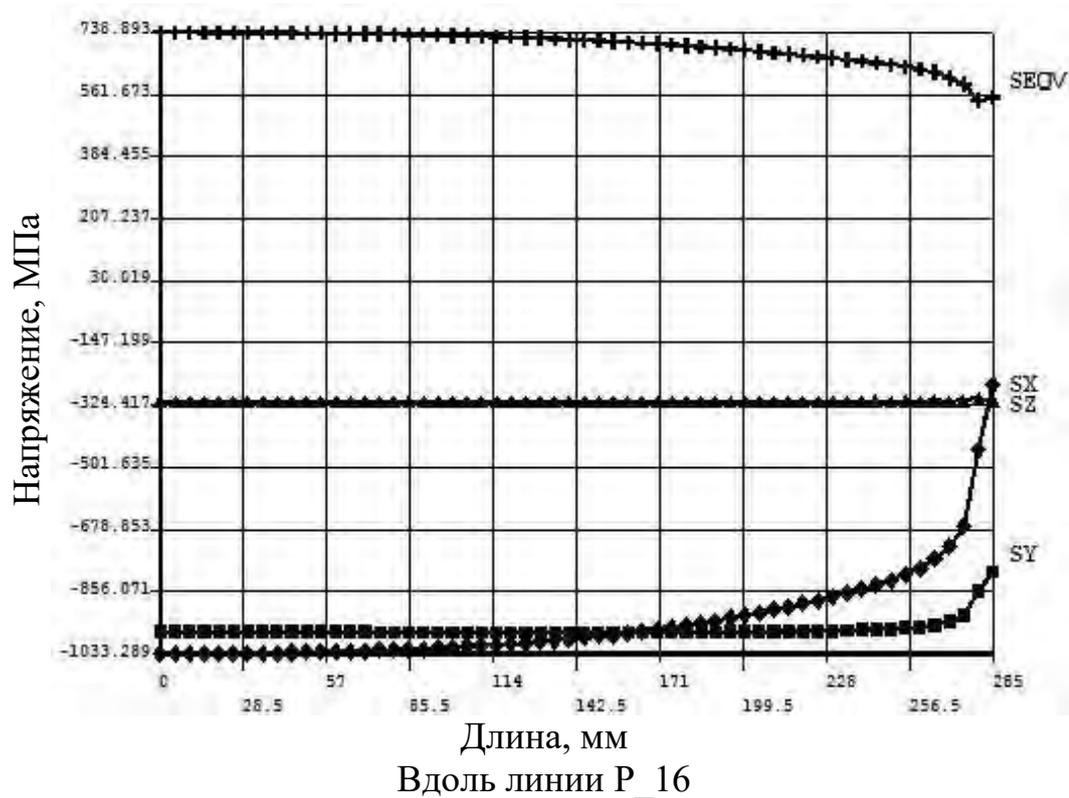
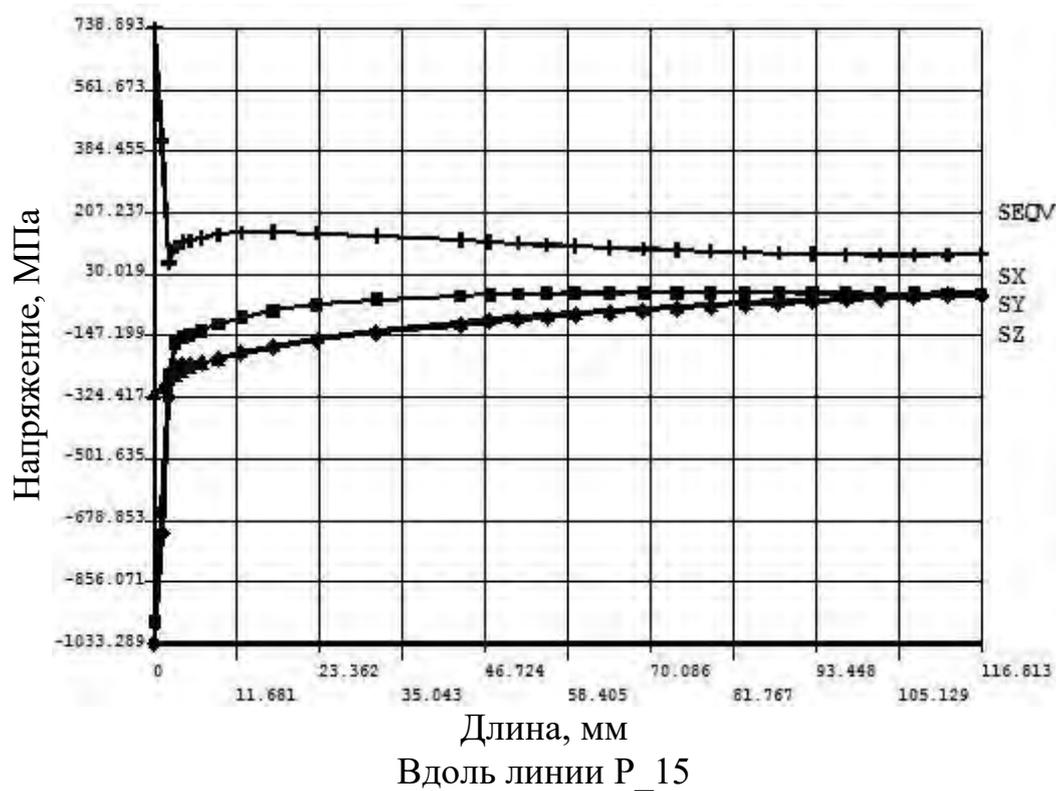


Рисунок 4.16 – Характер суммарных напряжений вдоль линий P_15 и P_16 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 1 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – водой

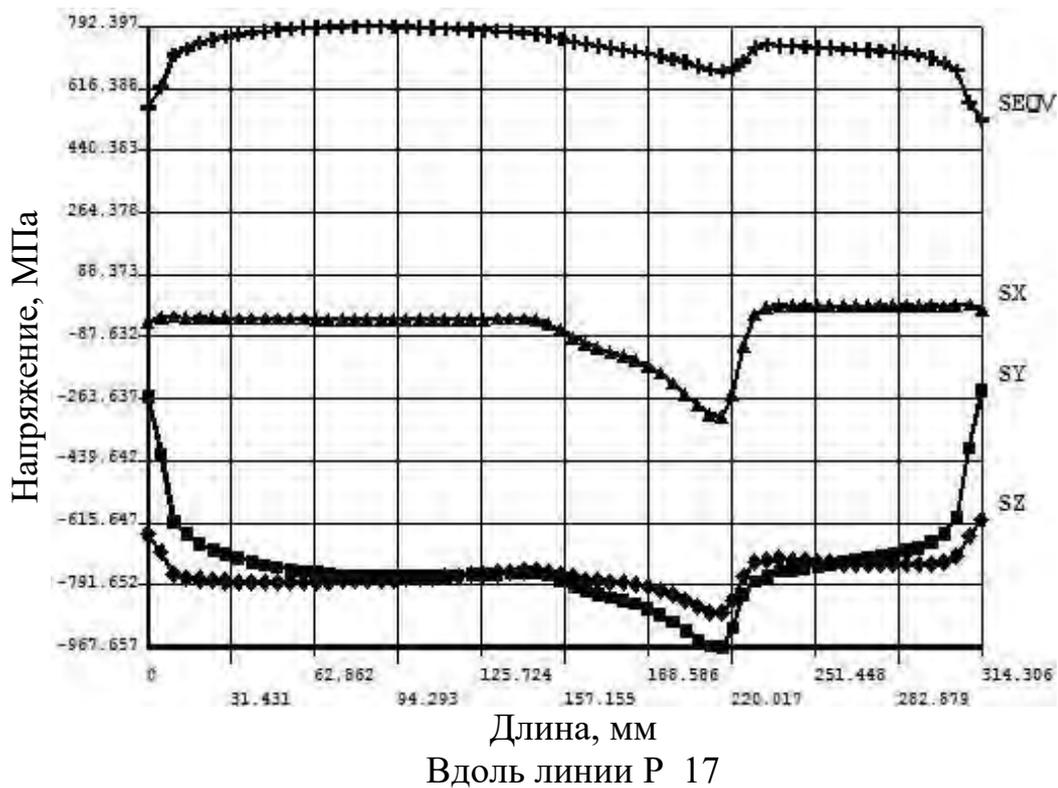


Рисунок 4.17 – Характер суммарных напряжений вдоль линий P_17 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 1 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – водой

Таблица 4.7 – Напряженное состояние стенки-бойка без каналов от воздействия усилия обжатия и температурной нагрузки

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС
1, P1	-48	-300	-255	-75	-741	-94	645	229
2, P2	-24	24	-783	0	-898	0	690	110
4, P3	-120	-35	-756	-20	-927	-20	606	95
5, P4	-42	-304	-238	-42	-697	-75	546	263
1, P5	-43	-220	-285	-43	-648	-73	562	199
2, P6	-39	-6	-756	-23	-756	-20	620	82
4, P7	-113	-63	-820	-27	-770	-63	592	120
5, P8	-39	-265	-235	-39	-605	-65	494	358

*ТС – Распределение напряжений по толщине стенки-бойка

Таблица 4.8 – Распределение осевых напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки по толщине приконтактного слоя, высоте и ширине стенки-бойка без каналов

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС
линия P9	-76	-319/-372	-272	-935/-272	-750	-1030/-672	679	869
линия P10	-80	-263/-90	-10	-169/79	-128	-245/-100	121	121
2, P11	-50	-50	-765	-607	-898	-246	856	510
2, P12	-11	-11	-71	-37	-143	95	121	108
4, P13	-117	-117	-836	-670	-927	-245	776	608
4, P14	-100	-183	-120	-120	-183	20	160	231
3, P15	-324	-324	-980	-30	-724	-30	560	90
3, P16	-324	-324	-980	-768	-1033	-320	738	561
линия P17	-57	-320/8	-263	-967/-263	-620	-870/-615	560	792

*ПС – Распределение напряжений по толщине приконтактного слоя

*КП – Распределение напряжений на контактной поверхности

Так суммарные напряжения от усилия обжатия и температурной нагрузки в направлении осей Y и Z в сечении 3 достигают соответственно максимальных значений - минус 980 МПа и минус 1033 МПа (рисунок 4.16).

В других сечениях осевые суммарные напряжения меньше и в направлении осей Y и Z их максимальные значения равны минус 836 МПа и минус 927 МПа.

Рисунок 4.13 (линия P9) характеризует распределение суммарных напряжений в приконтактном слое стенки-бойка без каналов по его высоте. Наибольшей величины суммарные напряжения имеют место на контактной поверхности стенки-бойка при обжатии заготовки и их максимальные значения в направлении осей X, Y и Z соответственно равны минус 324 МПа, минус 980 МПа и минус 1033 МПа. Однако в приконтактном слое стенки-бойка на глубине 5 мм эти напряжения значительно меньше и в направлении осей X, Y и Z они соответственно равны минус 263 МПа, минус 169 МПа и минус 245 МПа (рисунок 4.13, линия P10).

На рисунках 4.14 (линия P11) и 4.15 (линия P13) показан характер распределения по ширине стенки-бойка суммарных напряжений в

приконтактном слое стенки-бойка в сечениях 2 и 4. Максимальные значения суммарных напряжений имеют место на контактной поверхности и в направлении оси X они достигают величины минус 836 МПа, а в направлении оси Z – минус 927 МПа.

Распределение осевых суммарных напряжений на контактной поверхности стенок-бойков по их высоте показано на рисунке 4.17 (линия P17). Максимальной величины напряжение в направлении осей X, Y и Z достигают при обжати заготовки и они соответственно равны минус 320 МПа, минус 967 МПа и минус 870 МПа.

4.7. Напряженное состояние стенок-бойков без каналов установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб (нижняя оценка)

В разделе 4.6 были представлены результаты расчета напряженного состояния стенок-бойков без каналов при задании на поверхности их контакта при обжати заготовки в течение 0,1364 секунды плотности теплового потока - 20 МВт/(м²·К), в паузе - эффективный коэффициент теплоотдачи - 2000 Вт/(м²·К). При этом на торце стенки-бойка, задней стенке, сверху и снизу стенки-бойка - охлаждение водой с коэффициентом теплоотдачи 500 Вт/(м²·К) и температурой окружающей среды - 60 °С. Максимальная температура на поверхности стенок-бойков при контакте с заготовкой достигала высокой величины порядка 511 °С. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу на поверхности контакта при обжати заготовки находились так же на высоком уровне - 860 МПа. Следует отметить, что при отсутствии реперных точек по температурам трудно правильно обосновать принятые для расчета коэффициенты n на контактной поверхности стенок-бойков при рабочем ходе и в паузе.

В связи с этим будем считать полученные выше результаты расчета верхней оценкой напряженного состояния стенок-бойков.

В данном разделе приведены результаты расчета напряженного состояния стенок-бойков без каналов при уменьшенных в два раза значениях плотности теплового потока и эффективного коэффициента теплоотдачи (вариант 2). Представленные ниже результаты будем считать нижней оценкой напряженного состояния стенок-бойков

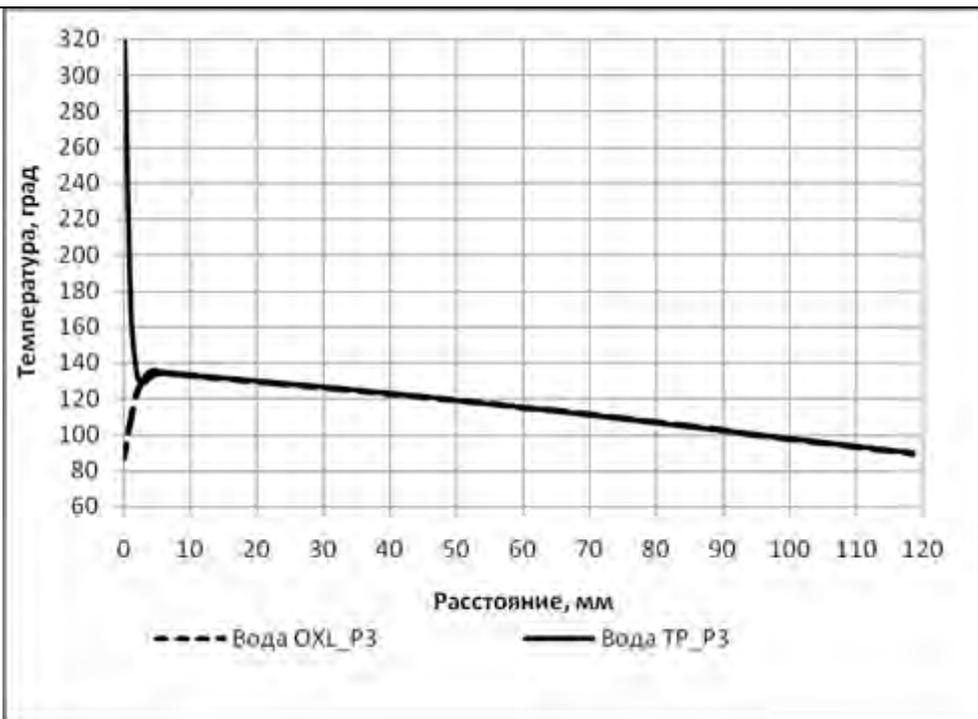
4.7.1. Температурное поле стенок бойков без каналов

На рисунке 4.18 показано распределение температур по толщине стенки-бойка и приконтактного слоя от поверхности контакта вглубь на 5 мм. Из рисунка следует, что от воздействия теплового потока и последующего охлаждения стенок-бойков водой максимальная температура на поверхности контакта при обжати заготовки достигает величины порядка 320 °С, затем на глубине 2,5 мм она снижается до 120 °С.

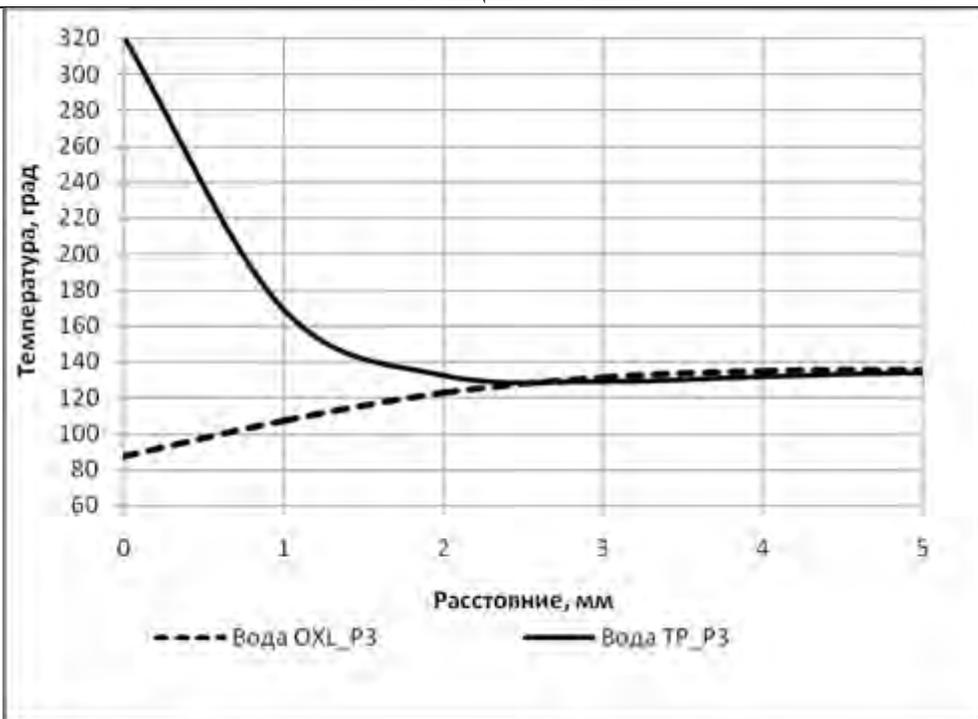
Следует отметить, что характер изменения температуры по ширине стенки-бойка практически не меняется и на боковой части стенки-бойка и он подобен изменению температуры по оси симметрии стенки-бойка (рис. 4.18). Температуры приведены на нескольких линиях. Поскольку изменения температур по другим линиям подобно.

4.7.2. Напряженное состояние приконтактного слоя стенки-бойка без каналов от воздействия температурного поля при обжати заготовки и при охлаждении водой на холостом ходу

Для приведенных на рисунке 4.18 полей температур были определены величины осевых термоупругих напряжений (S_X , S_Y , S_Z) и эквивалентных напряжений по Мизесу ($SEQV$), возникающих в стенках-бойках без каналов установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при обжати заготовки и при охлаждении их водой во время холостого хода.



По толщине бойка



От поверхности контакта вглубь на 5мм

Рисунок 4.18 – Характер температур вдоль линии Р_3 от воздействия на боек теплового потока (ТР) и охлаждения водой (ОХЛ).

Результаты расчета осевых термоупругих напряжений и эквивалентных напряжений по Мизесу, возникающих в приконтактном слое стенки-бойка без каналов, приведены на рисунке 4.19 и в таблицах 4.9 и 4.10.

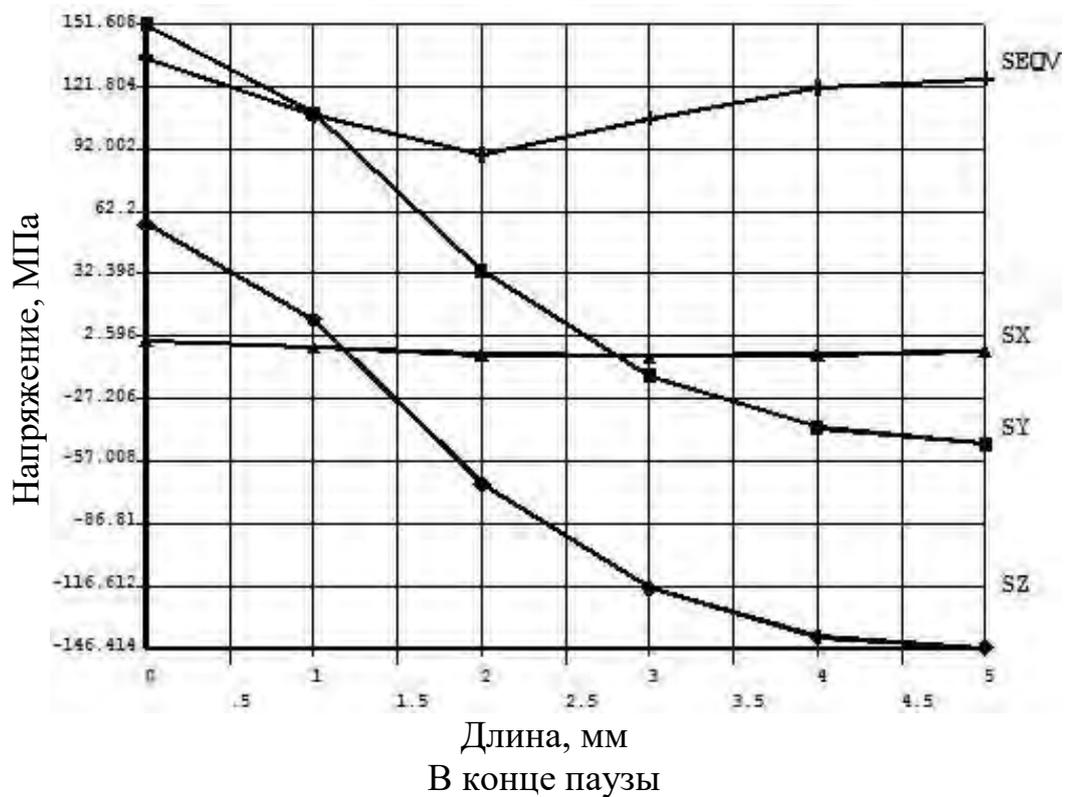
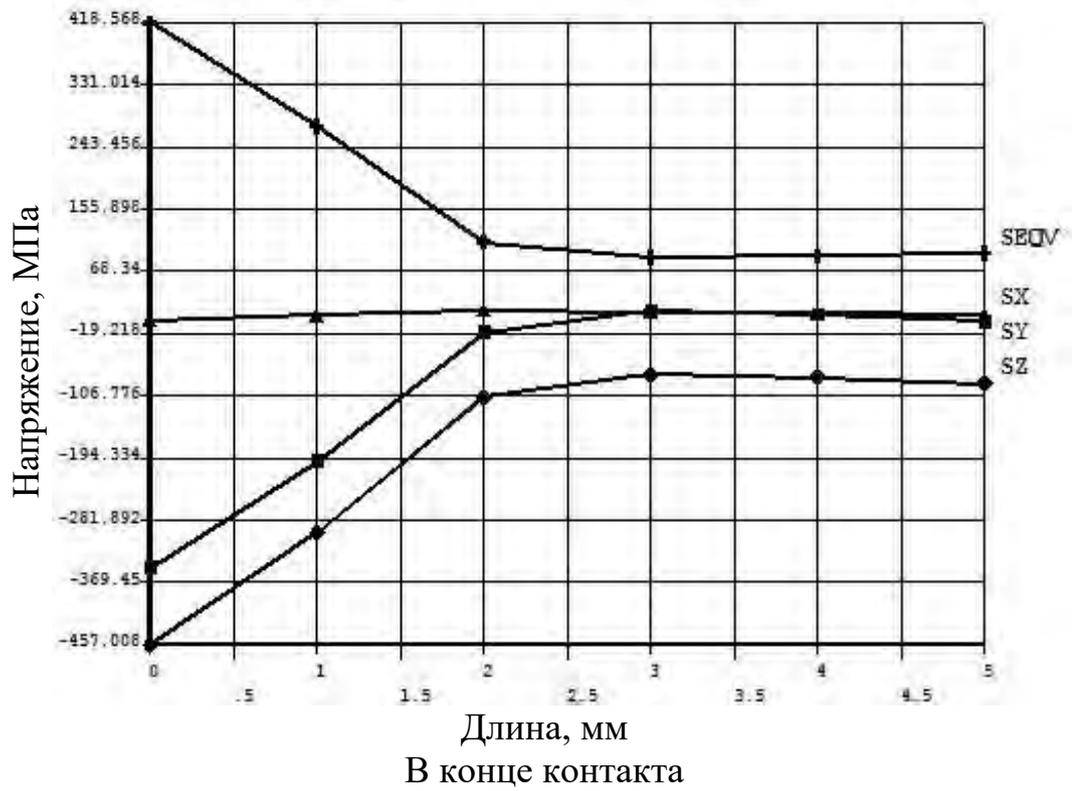


Рисунок 4.19 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий Р_3 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой.

Таблица 4.9 - Распределение термоупругих напряжений по толщине приконтактного слоя стенок-бойков без каналов при обжати заготовки. Плотность теплового потока 10 МВт/(м²·К). Охлаждение боковых поверхностей стенки-бойка и суппорта водой

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	кп	пс	кп	пс	кп	пс	кп	пс
1, P1	-24	-39	-129	49	-397	-99	347	85
2, P2	-13	-13	-411	-68	-486	-138	458	80
4, P3	-2	1	-347	-19	-457	-106	418	90
5, P4	-7	-21	-113	47	-367	-86	324	63
1, P5	-21	-37	-125	48	-318	-21	276	38
2, P6	-8	0	-394	-39	-370	0	394	39
4, P7	3	3	-349	2	-349	2	354	2
5, P8	-8	-31	-116	9	-289	-36	252	35

Таблица 4.10 - Распределение термоупругих напряжений по толщине приконтактного слоя стенок-бойков без каналов на холостом ходу. Плотность теплового потока 10 МВт/(м²·К). Охлаждение боковых поверхностей стенки-бойка и суппорта водой

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	кп	пс	кп	пс	кп	пс	кп	пс
1, P1	5	28	44	-16	5	-116	46	124
2, P2	5	-4	98	-96	35	-166	90	145
4, P3	0	-5	151	-50	56	-146	136	121
5, P4	2	22	37	-8	34	-91	37	105
1, P5	7	28	44	-12	92	-40	95	60
2, P6	3	-3	107	-87	156	-51	139	83
4, P7	-1	-5	148	-48	169	-44	164	42
5, P8	1	24	39	-13	117	-20	143	44

Ниже на рисунках осевые термоупругие напряжения, возникающие в стенках бойках без каналов при обжати заготовки обозначены «тр», а на

холостом ходу - «охл». В таблицах термоупругие напряжения, возникающие на контактной поверхности стенки-бойка, обозначены «кп», а в приконтактном слое стенки-бойка на глубине 5 мм - «пс».

Представленные результаты характеризуют закономерности распределения осевых термоупругих и эквивалентных напряжений как по толщине приконтактного слоя, так и по высоте и ширине стенки-бойка без каналов при обжатии заготовки и на холостом ходу.

Эти данные свидетельствуют о том, что в зоне контакта стенки-бойка с заготовкой от воздействия температурной нагрузки в приконтактном слое стенки-бойка возникают сжимающие напряжения, имеющие наибольшие значения на контактной поверхности. Затем сжимающие термоупругие напряжения снижаются и достигают минимальных значений на глубине приконтактного слоя, равного 2 мм (рисунки 4.19, таблица 4.9).

Максимальные термоупругие напряжения, как правило, возникают вдоль осей Y и Z . Так в сечении 2 термоупругие напряжения в направлении оси Z достигают на контактной поверхности стенки-бойка величины, равной минус 486 МПа, а затем по толщине приконтактного слоя снижаются до величины минус 138 МПа (таблица 4.9). В том же сечении термоупругое напряжение в направлении оси Y изменяется по толщине приконтактного слоя от минус 411 МПа до минус 68 МПа. Если оценивать распределение термоупругих напряжений в приконтактном слое стенки-бойка по ее высоте, то в сечении 3, значения термоупругих напряжений меньше и они в направлении оси Y изменяются по толщине приконтактного слоя от минус 347 МПа до минус 19 МПа, а в направлении оси Z - от минус 457 МПа до минус 106 МПа (рисунок 4.19, таблица 4.9). Напряжения по Мизесу по высоте стенки-бойка без каналов распределяются неравномерно и изменяются на контактной поверхности в диапазоне 324-458 МПа.

Представляют интерес закономерности распределения осевых термоупругих напряжений в приконтактном слое стенок-бойков без каналов при охлаждении их водой на холостом ходу. В отличие от характера

распределения термоупругих напряжений по толщине приконтактного слоя стенок-бойков при обжати заготовки, на холостом ходу при охлаждении стенок-бойков водой на контактной поверхности стенок-бойков возникают растягивающие напряжения, которые по толщине приконтактного слоя переходят в сжимающие (таблица 4.10). Так в сечении 2, растягивающее напряжение на контактной поверхности в направлении оси Y величиной 98 МПа переходят по толщине приконтактного слоя в сжимающие величиной минус 96 МПа, а в сечении 4 растягивающее напряжение S_Y величиной 151 МПа переходит в сжимающее величиной минус 50 МПа. Такую же закономерность распределения по толщине приконтактного слоя имеет и напряжение в направлении оси Z , которое из растягивающего величиной 35 МПа переходит в сжимающее величиной минус 166 МПа.

4.7.3 Распределение термоупругих напряжений по толщине и высоте стенки-бойка без каналов при обжати заготовки и на холостом ходу

Результаты расчета осевых термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов сборного кристаллизатора при обжати заготовки и на холостом ходу приведены на рисунках 4.20 - 4.24 и в таблицах 4.11 и 4.12. Эти результаты характеризуют закономерности распределения осевых термоупругих и эквивалентных напряжений как по толщине и высоте, а также по толщине приконтактного слоя стенок-бойков без каналов при воздействии температурной нагрузки при обжати заготовки и охлаждение их водой на холостом ходу. Эти данные свидетельствуют о том, что осевые термоупругие напряжения являются сжимающими и достигают на контактной поверхности стенки-бойка без каналов наибольших величин в направлении осей Y и Z . Например, в сечении 2 термоупругое напряжение в направлении оси Y равно минус 411 МПа, которое по толщине стенки-бойка снижается до минус 14 МПа. В этом же сечении термоупругое напряжение в

направлении оси Z достигает высокой величины, равной минус 486 МПа (рисунок 4.20, таблица 4.11).

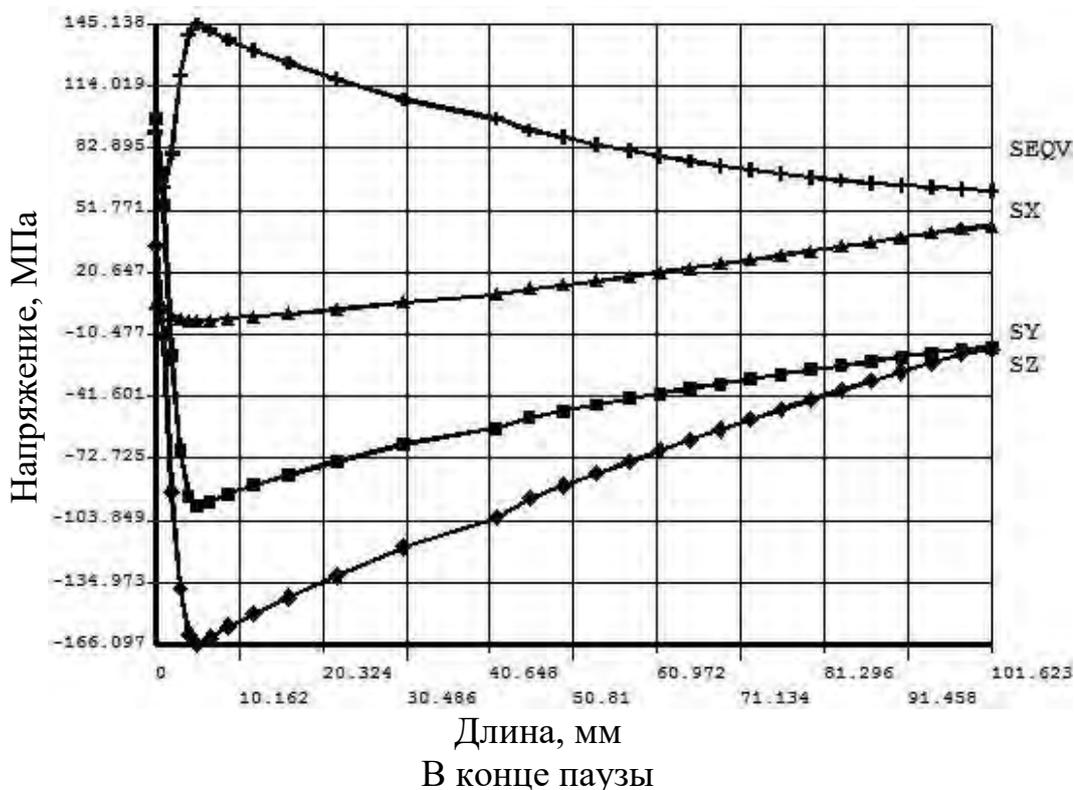
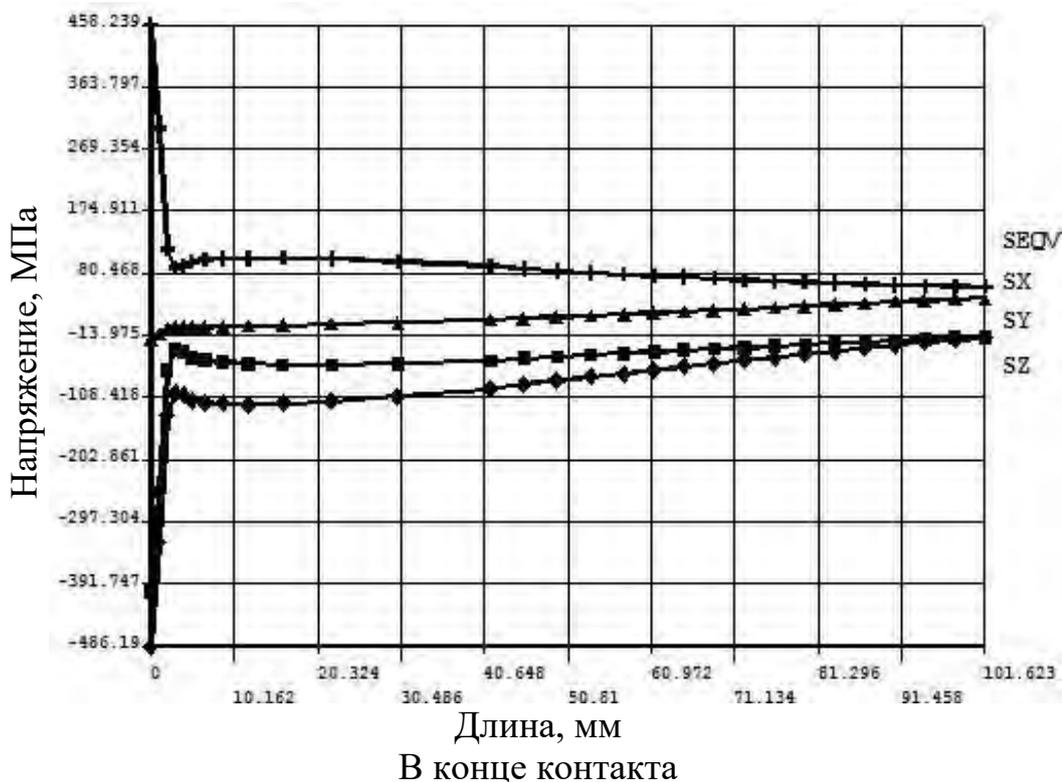


Рисунок 4.20 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_2 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой.

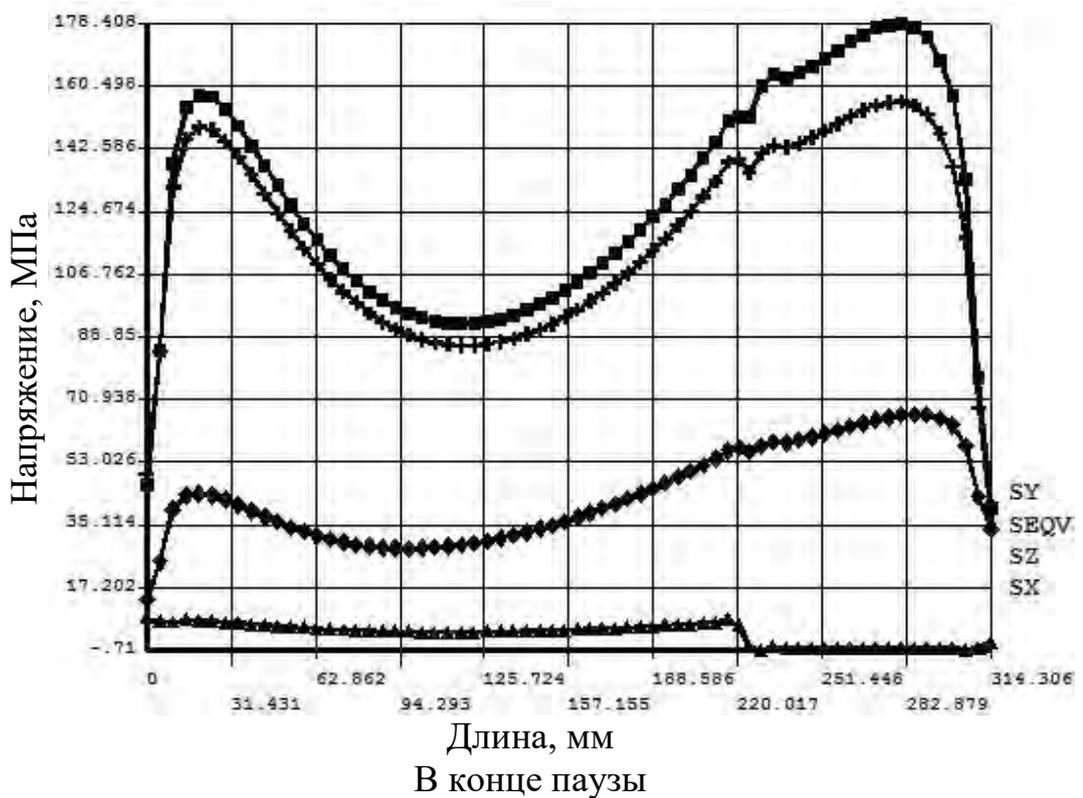
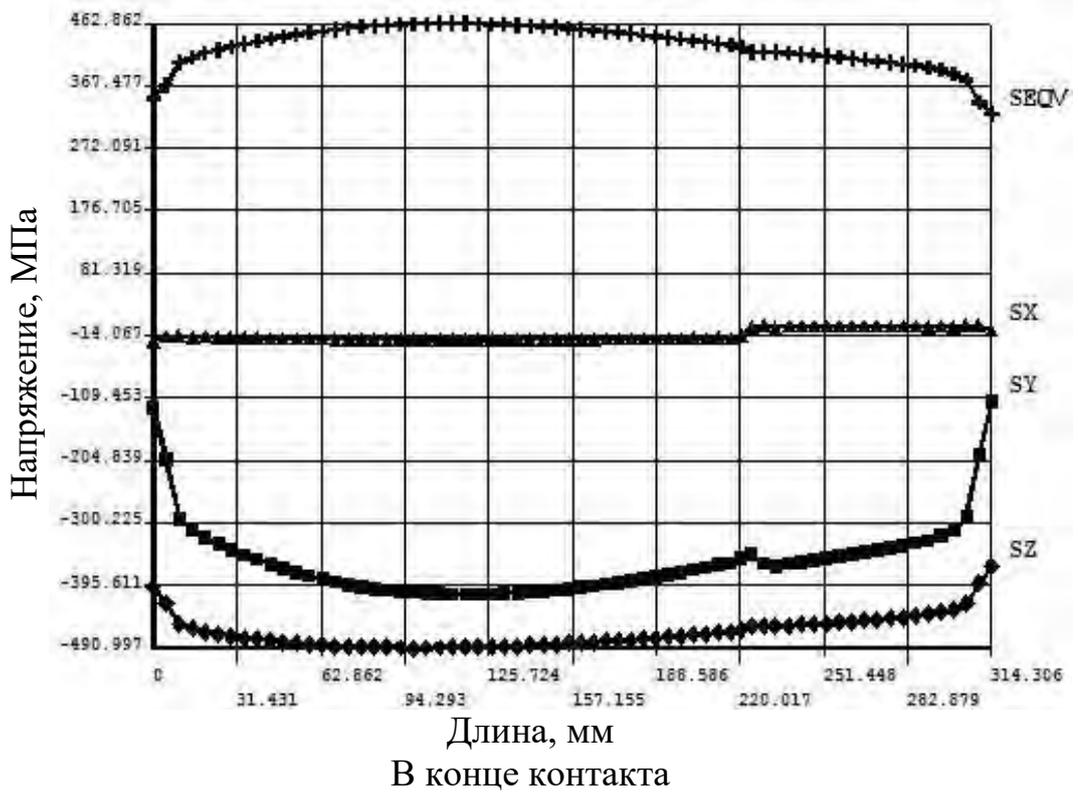


Рисунок 4.21 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_9 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой.

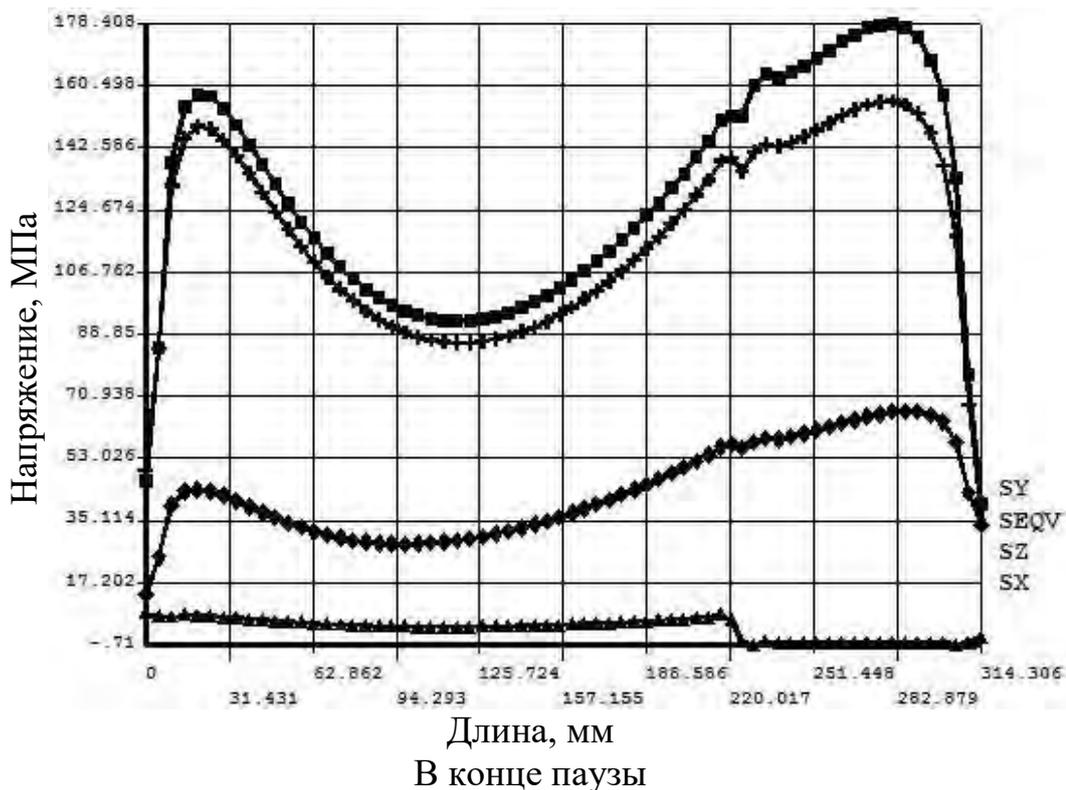
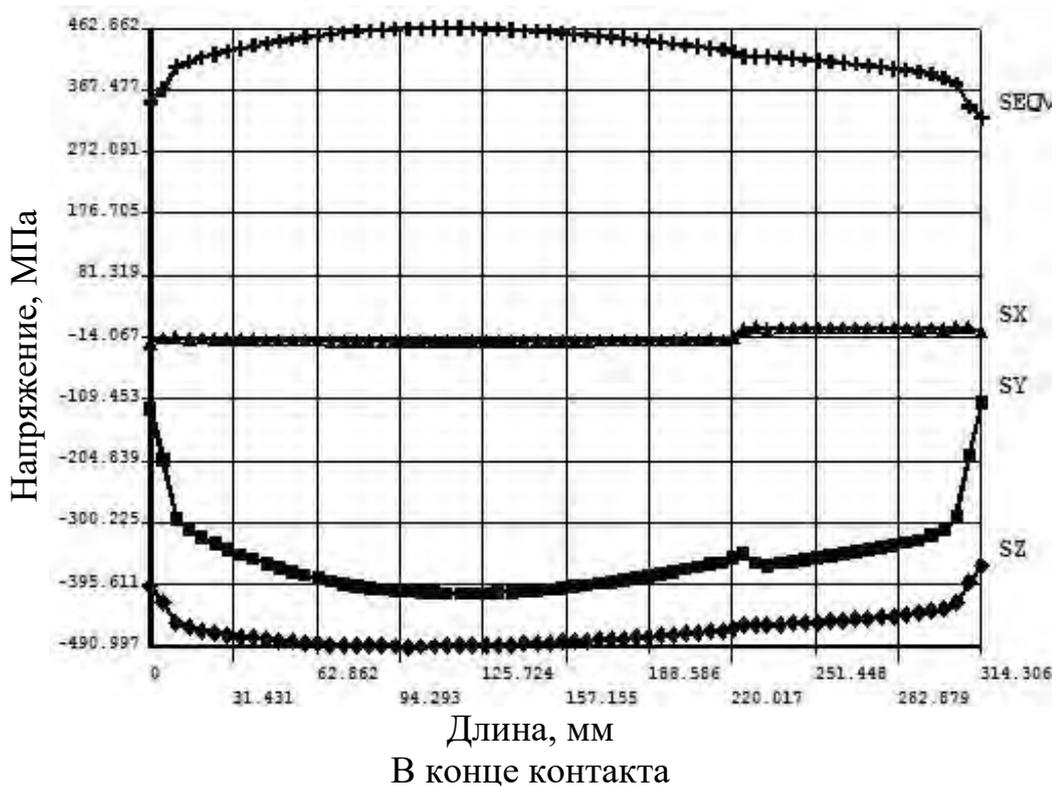


Рисунок 4.21 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_10 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой.

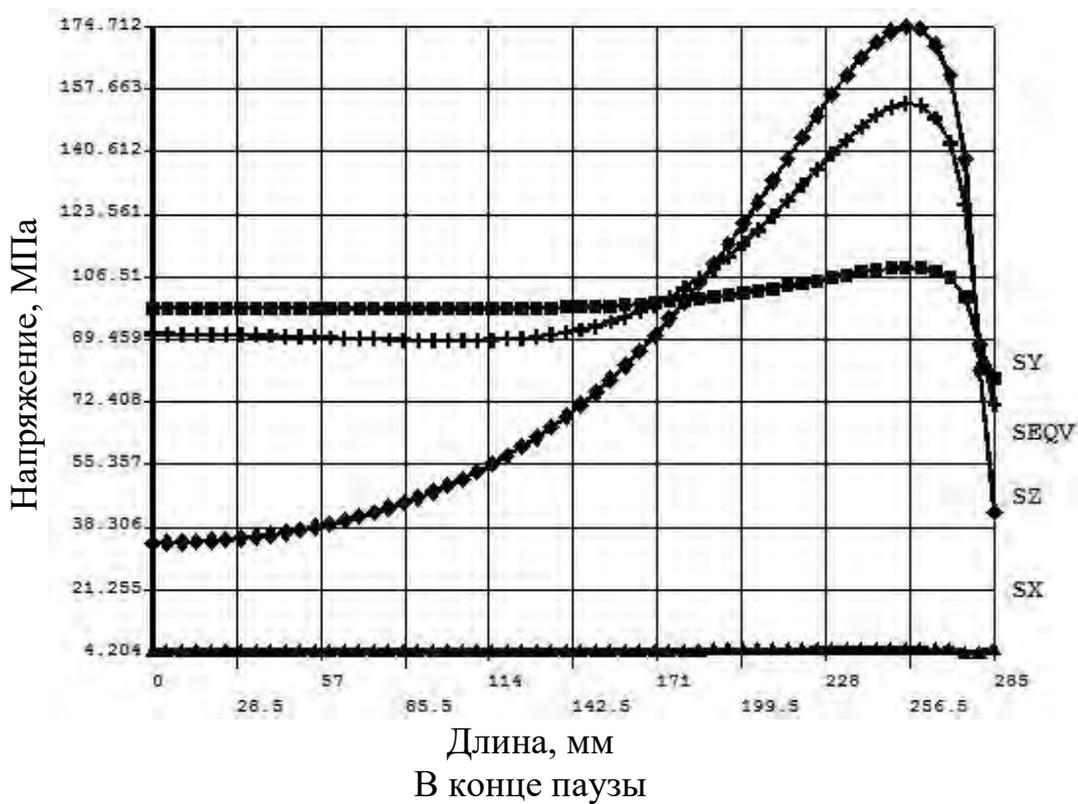
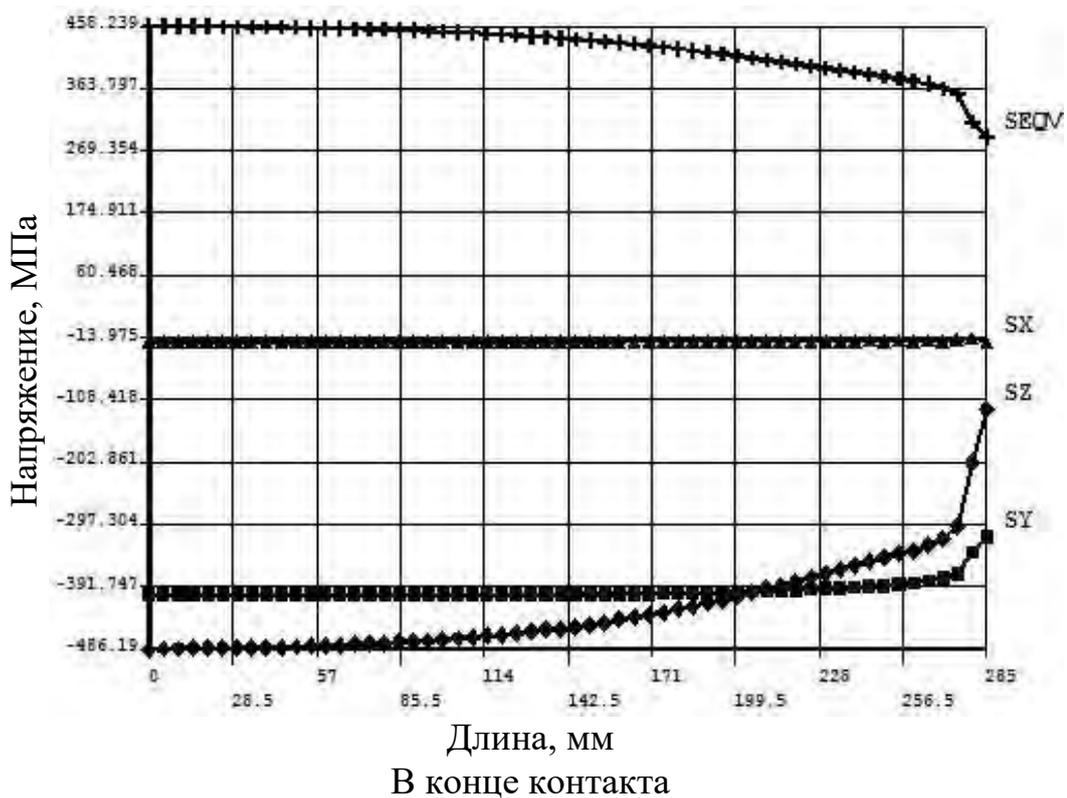


Рисунок 4.22 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий Р_11 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой.

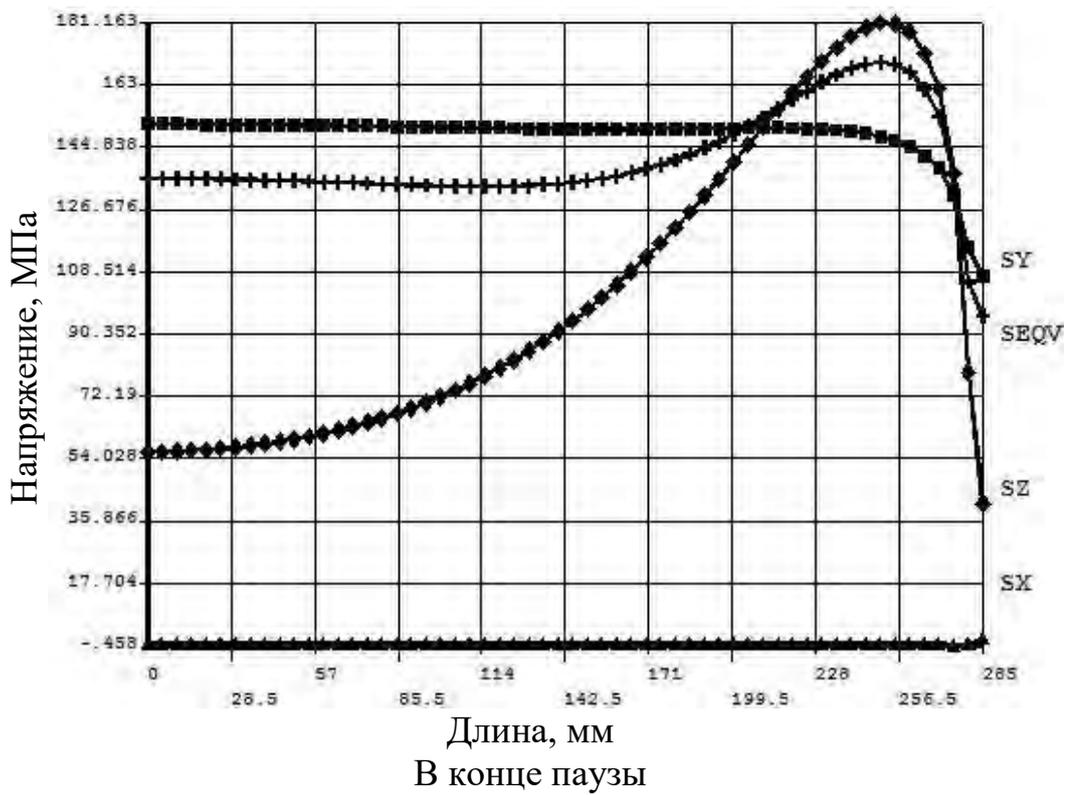
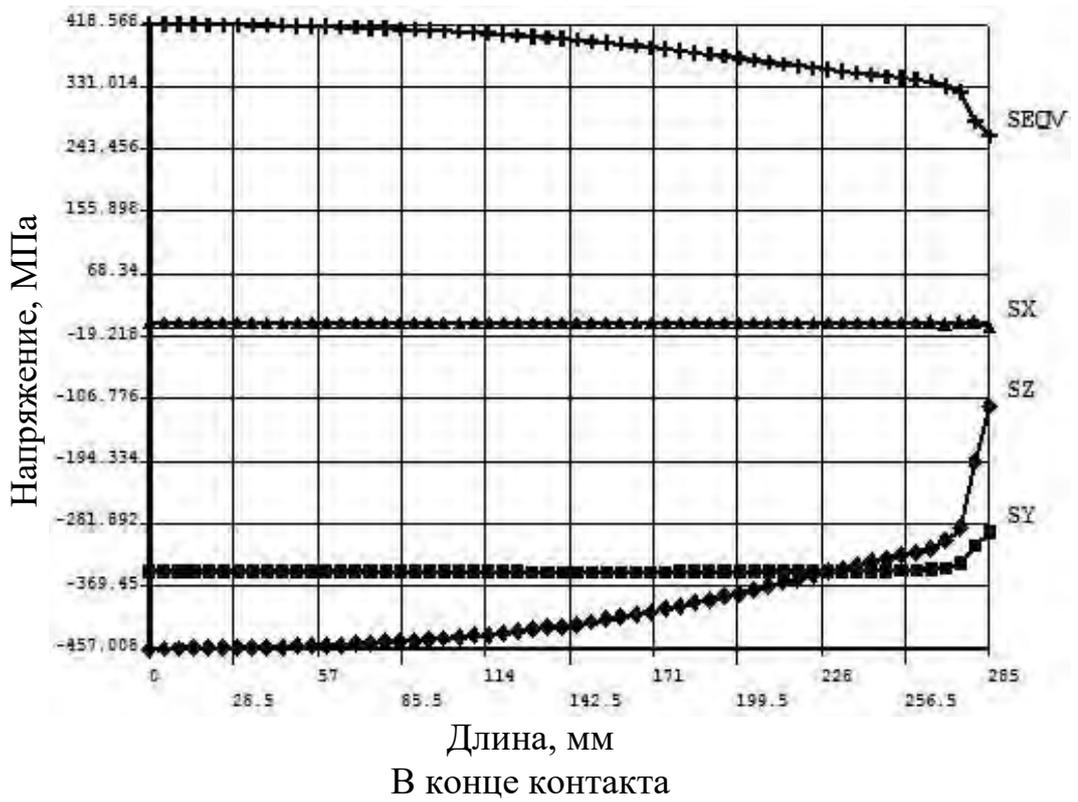


Рисунок 4.23 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_13 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой.

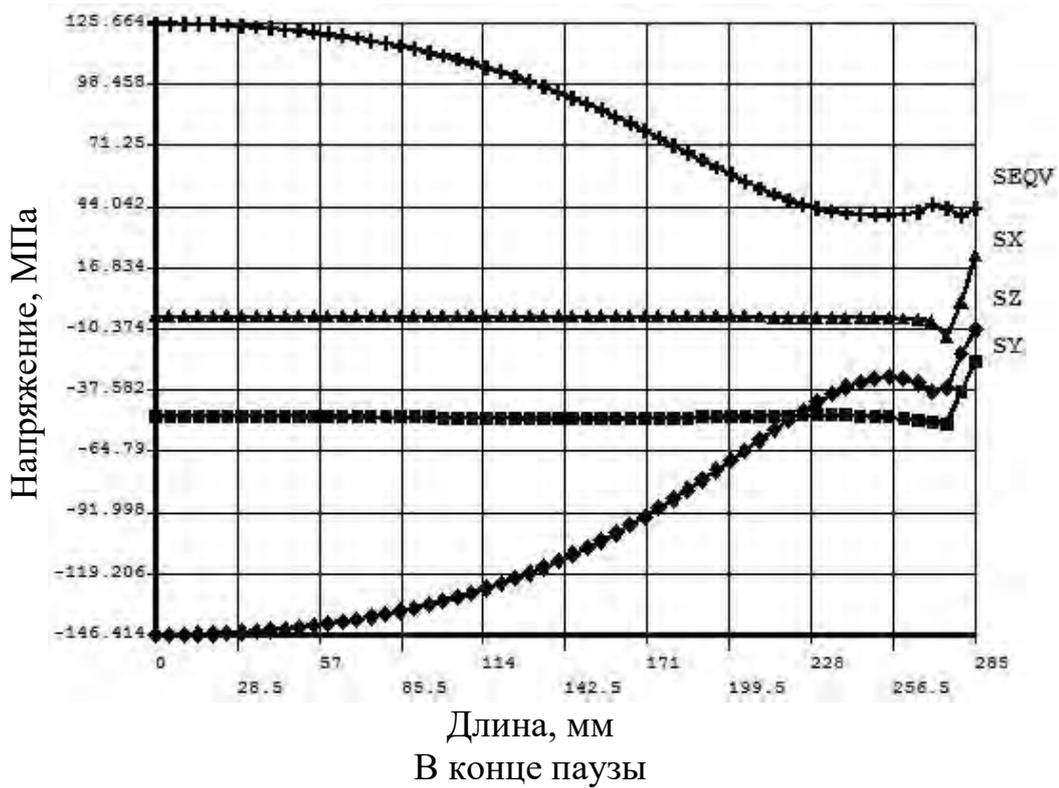
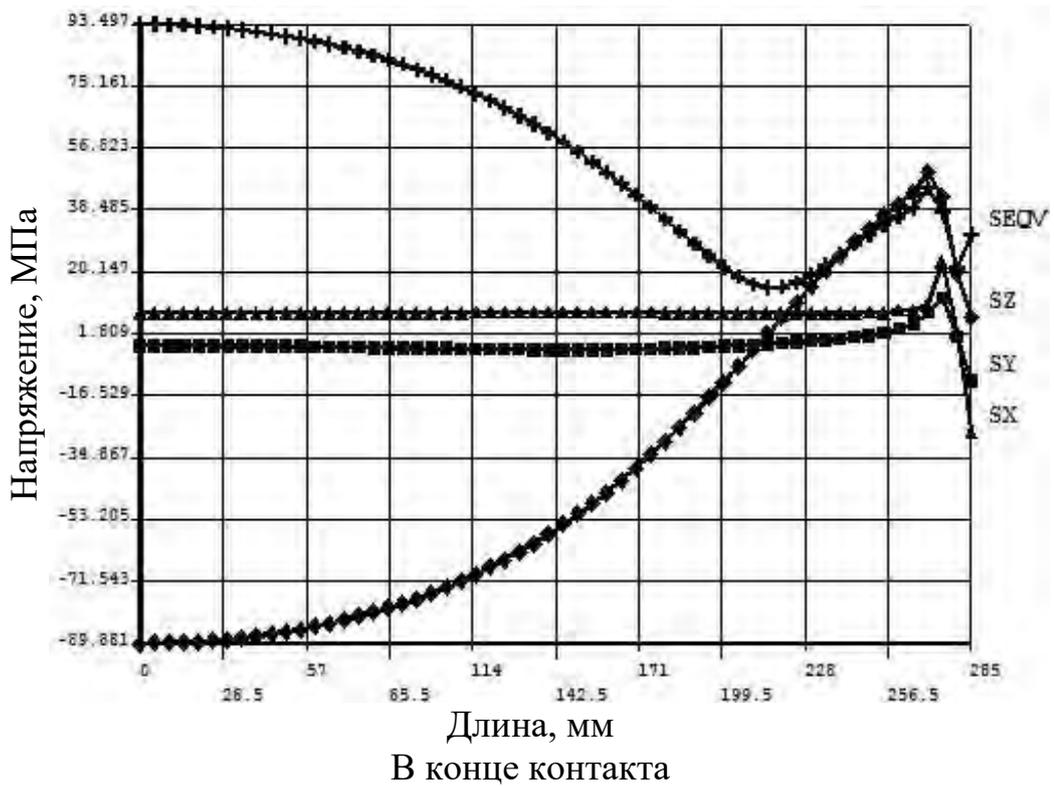


Рисунок 4.24 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_14 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой

Таблица 4.11 – Распределение термоупругих напряжений в стенках бойках без каналов при обжатию заготовки. Плотность теплового потока 10 МВт/(м²·К). Охлаждение поверхностей стенки-бойка водой

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	ос	тс	ос	тс	ос	тс	ос	тс
1, P1	-24	-249	-129	-61	-397	-99	347	223
2, P2	-13	20	-411	-14	-486	-14	459	60
4, P3	-2	25	-347	-4	-457	-4	418	68
5, P4	-7	-159	-113	-21	-367	-24	324	144
1, P5	-21	-189	-125	-41	-318	-60	276	177
2, P6	-8	29	-394	0	-370	0	394	79
4, P7	3	3	-349	3	-349	3	354	73
5, P8	-8	-140	-116	-8	-289	-18	252	143
линия P9	-14	-14	-129	-395/-109	-395	-490/-362	367	462
линия P10	-36	-3/-37	4/42	-48/42	-90	-116/-60	67/110	65
2, P11	-13	-13	-391	-277	-486	-108	458	283
2, P12	-3	-28	-49	-28	-112	44/3	97	55
4, P13	-2	-2	-353	-281	-457	-106	416	243
4, P14	6	20/-25	-2	-12	-90	47/6	93	29

Рисунок 4.21 и таблица 4.11 характеризуют закономерности распределения термоупругих напряжений по высоте стенки-бойка и его приконтактного слоя при обжатию заготовки. Термоупругие напряжения в направлении осей Y и Z достигают на контактной поверхности стенок-бойков максимальных величин, равных соответственно минус 395 МПа и минус 490 МПа. Однако по толщине приконтактного слоя эти напряжения снижаются соответственно до минус 48 МПа и минус 90 МПа.

В отличие от термоупругих напряжений от температурной нагрузки термоупругие напряжения в стенках-бойках без каналов на холостом ходу распределяются по толщине и высоте стенок-бойков крайне неравномерно. При охлаждении водой контактной поверхности стенок-бойков после обжатию заготовки на ней, особенно в направлении осей Y и Z возникают

растягивающие напряжения величиной 96-169 МПа, которые на глубине стенки-бойка порядка 5 мм переходят в сжимающие с максимальной величиной до минус 178 МПа.

Рисунок 4.21 и таблица 4.12 характеризуют распределение термоупругих напряжений по высоте и толщине приконтактного слоя стенки-бойка на холостом ходу.

Таблица 4.12– Распределение термоупругих напряжений в стенках бойках без каналов на холостом ходу при охлаждении их водой. Плотность теплового потока 10 Вт/(м²·К)

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	ос		ос		ос		ос	
1, P1	4/28	-260	44	-68	-2/-116	-100	44	220
2, P2	0	41	96/-96	-17	35/-166	-17	51/145	62
4, P3	3	38	151/-50	-4	57/-146	-4	121	72
5, P4	-4	-163	37/-8	-15	2/22	-38	22/105	146
1, P5	10/26	-192	44/-15	-40	92/-40	-66	35	187
2, P6	2	29	107/-87	-2	156/-58	-2	83	83
4, P7	-5	16	148/-48	5	-169/-42	5	126	82
5, P8	1	-143	39/-13	-8	47/-20	-18	102	146
линия P9	8	0	47/156	94/178 /38	14/44	64/39	50/148	88/156 /35
линия P10	26/-5	21	-10/-100	-10	-105/-170	-90	117/149	107
2, P11	4	4	97	106/80	34	174/41	89	153/72
2, P12	-7	-7/20	-97	-41	-166	-10	145	62
4, P13	0	0	153	108	54	181/41	135	169/36
4, P14	-5	-5/16	-50	-23	-146	-10	125	44

Из них следует, что термоупругие напряжения в направлении осей Y и Z растягивающие и распределяются по высоте стенки-бойка крайне неравномерно. В частности, термоупругое напряжение в направлении оси Y на контактной поверхности равно 47 МПа, затем резко возрастает до 156 МПа, далее снова снижается до 94 МПа и возрастает до максимальной

величины 178 МПа. Следует отметить, что в приконтактном слое толщиной 5 мм термоупругие напряжения в направлении осей Y и Z переходят в сжимающие, достигающие величины порядка минус 90-170 МПа.

Рисунок 4.23 (линия P13) характеризует распределение термоупругих напряжений на контактной поверхности стенки-бойка по его ширине при обжати заготовки и на холостом ходу. При обжати заготовки на контактной поверхности по оси симметрии стенки бойка в направлении осей Y и Z возникают осевые сжимающие термоупругие напряжения величиной соответственно минус 457 МПа и минус 353 МПа, которые по ширине стенки бойка снижаются до минус 281 МПа и минус 106 МПа. Однако на холостом ходу термоупругие напряжения S_Y и S_Z на контактной поверхности по оси симметрии стенки-бойка растягивающие соответственно равные 153 МПа и 54 МПа, которые по ширине стенки бойка изменяются соответственно до 108 МПа и 181 МПа.

4.7.4 Напряженное состояние стенки-бойка без каналов от усилия обжати и температурной нагрузки (нижняя оценка)

Результаты расчета напряженного состояния стенки-бойка установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации от усилия обжати и температурной нагрузки при получении листов сечением 3×2250 м из стали 09Г2С приведены на рисунках 4.25 - 4.30 и в таблице 4.13. Температура контактной поверхности стенки-бойка равна 311 °С. Эти данные характеризуют закономерности распределения суммарных напряжений в стенках-бойках без каналов как по толщине и высоте, так и по толщине приконтактного слоя при обжати заготовки. Что касается распределения осевых суммарных напряжений по толщине стенки-бойка без каналов, то они сжимающие и максимальной величины достигают в направлении осей Y и Z на контактной поверхности, которая соответственно равна минус 592 МПа и минус 615 МПа (рисунок 4.25, таблица 4.13).

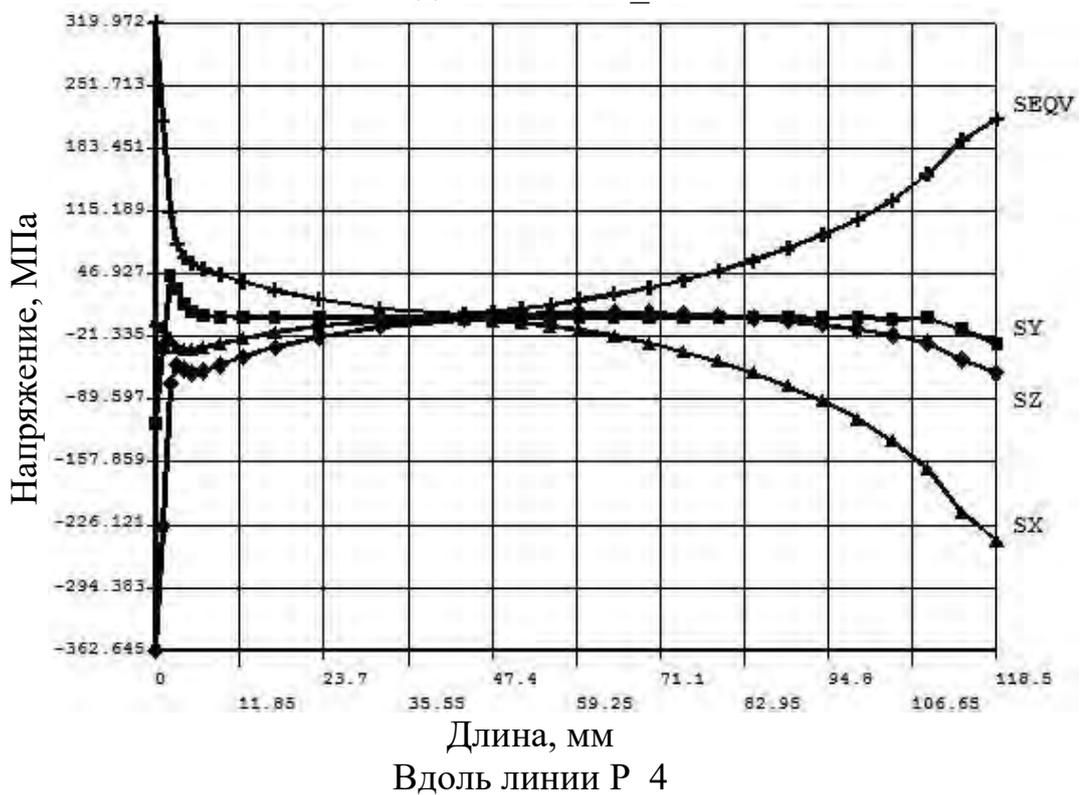
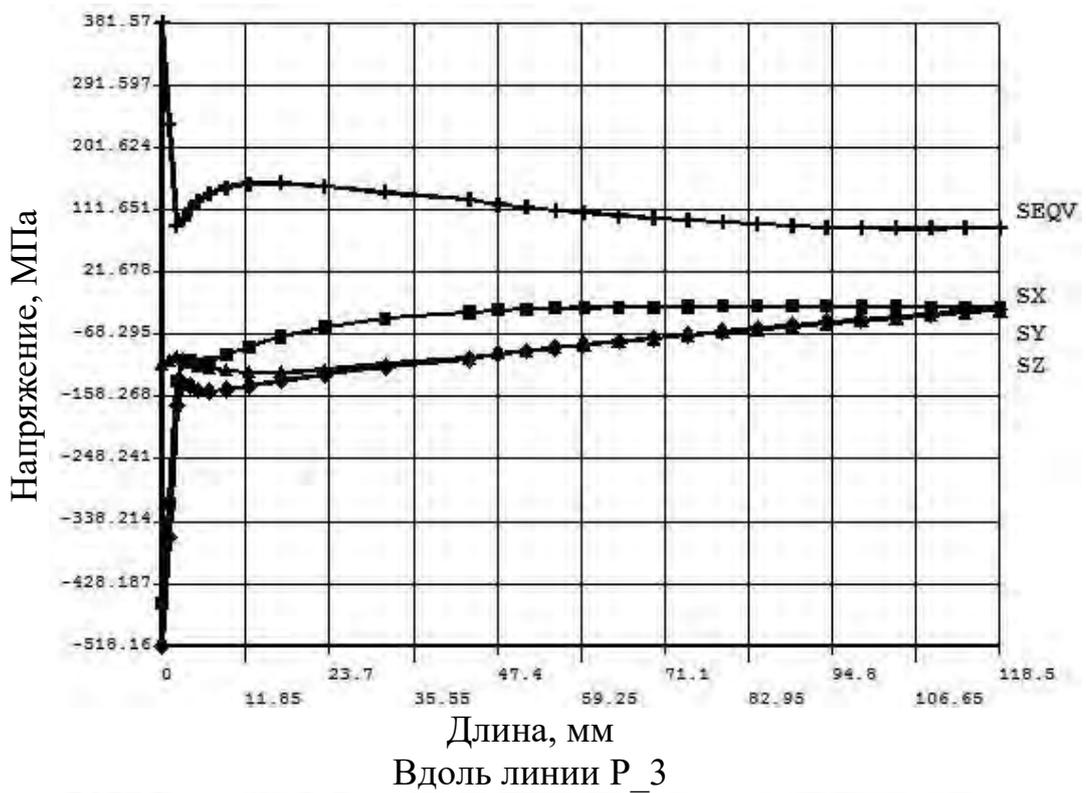


Рисунок 4.25 – Характер суммарных напряжений вдоль линий P_3 и P_4 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе.

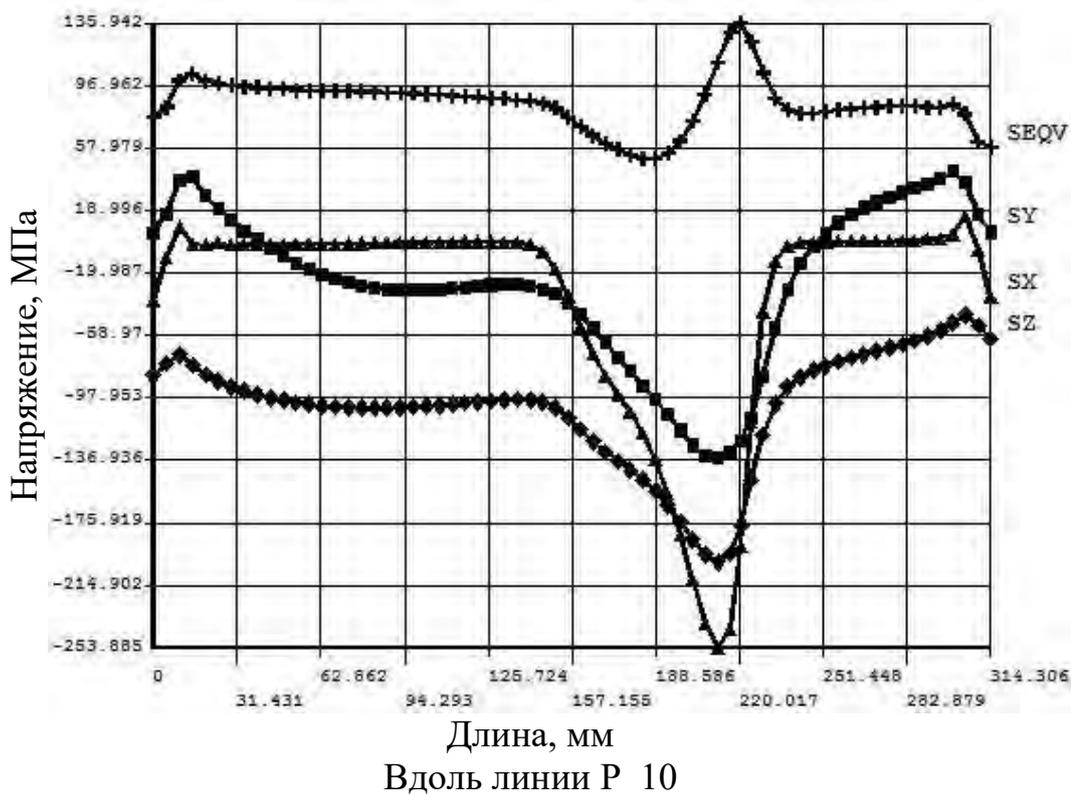
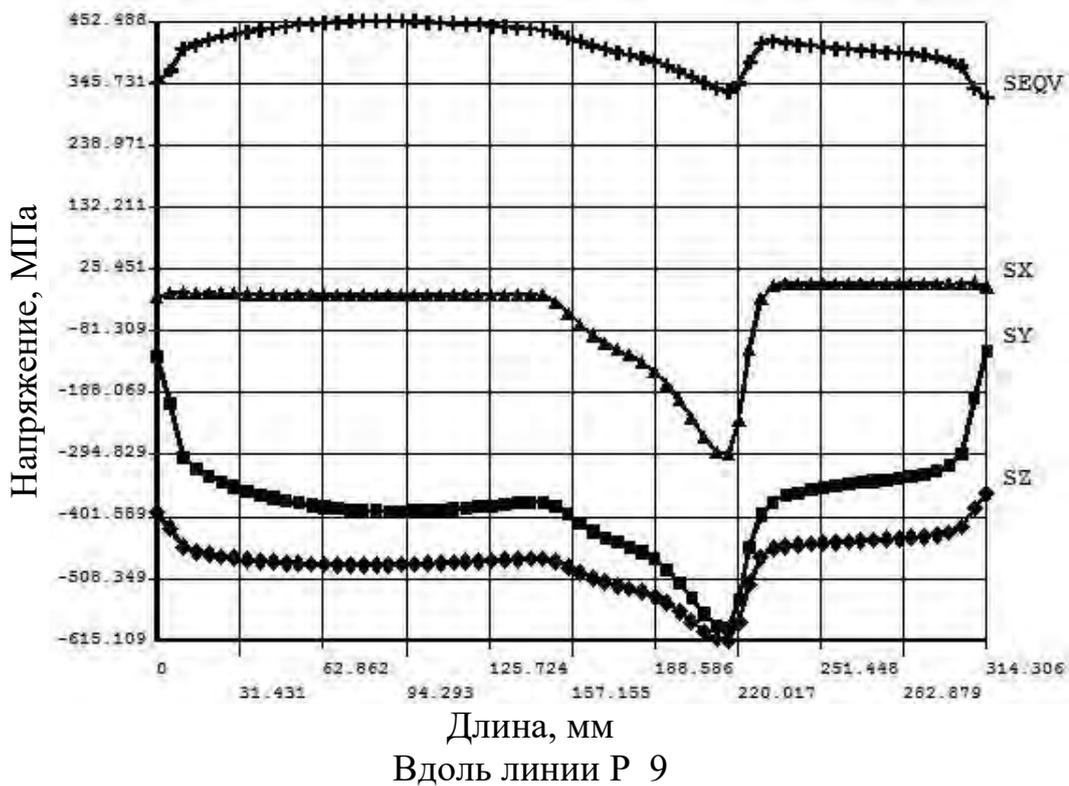


Рисунок 4.26 – Характер суммарных напряжений вдоль линий P_9 и P_10 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе.

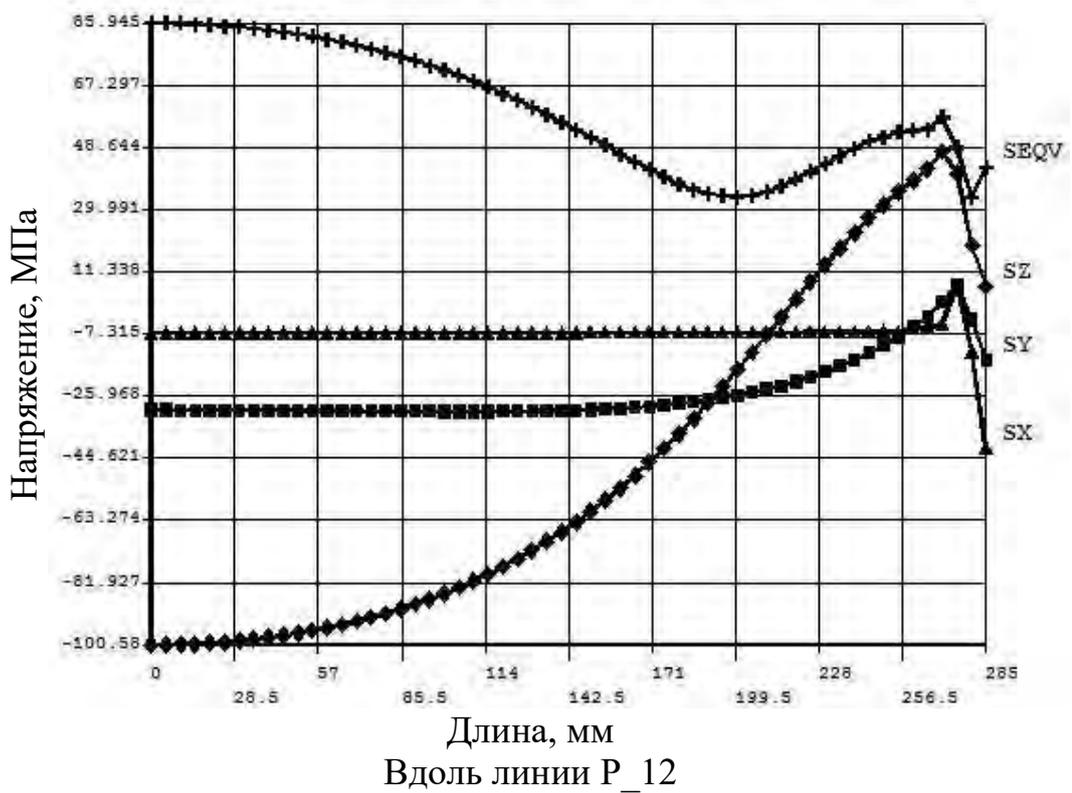
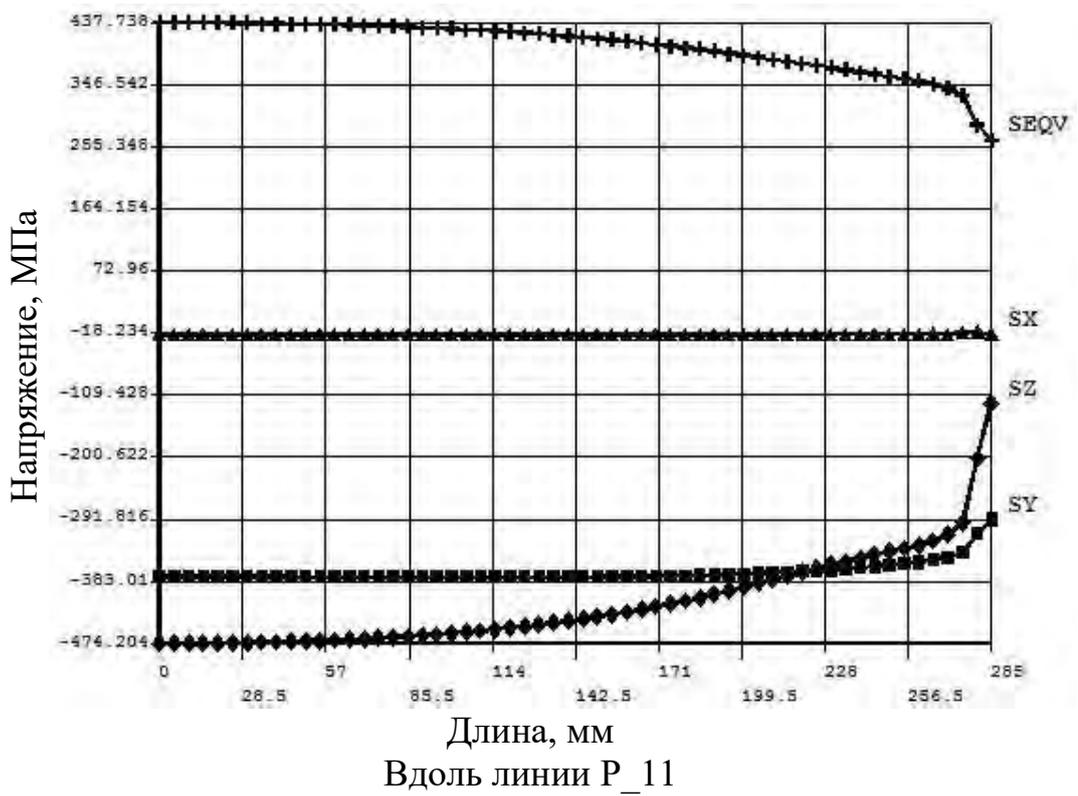


Рисунок 4.27– Характер суммарных напряжений вдоль линий P_11 и P_12 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе.

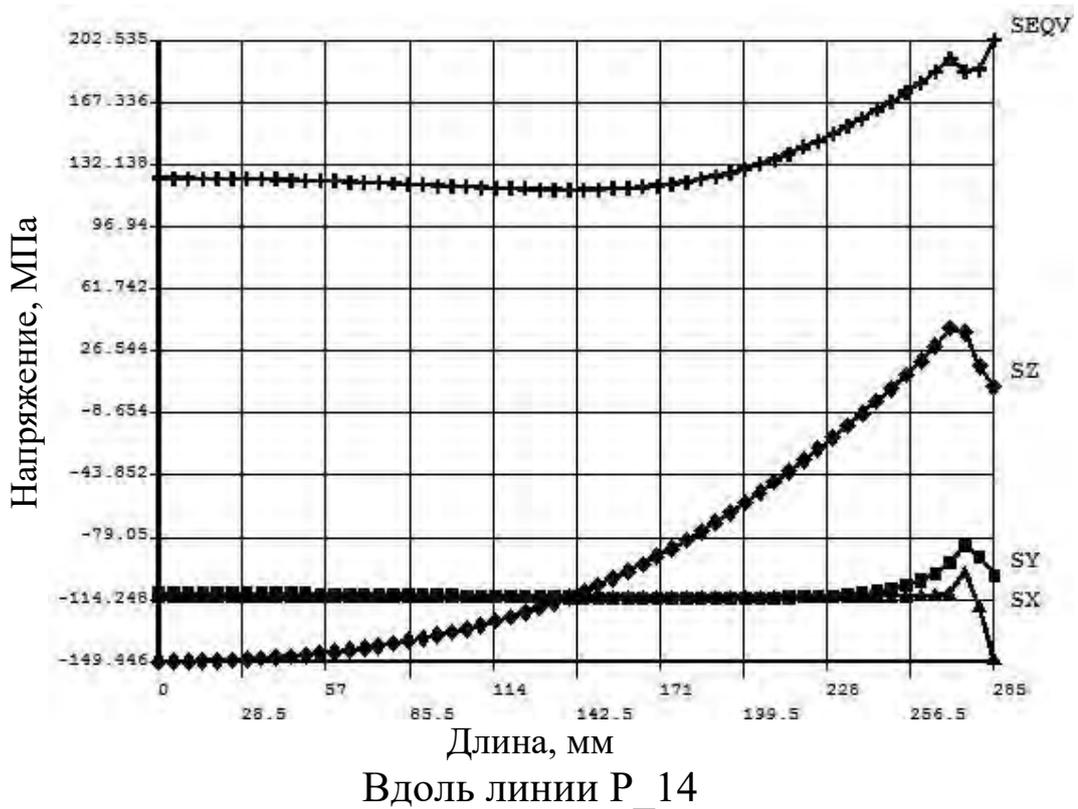
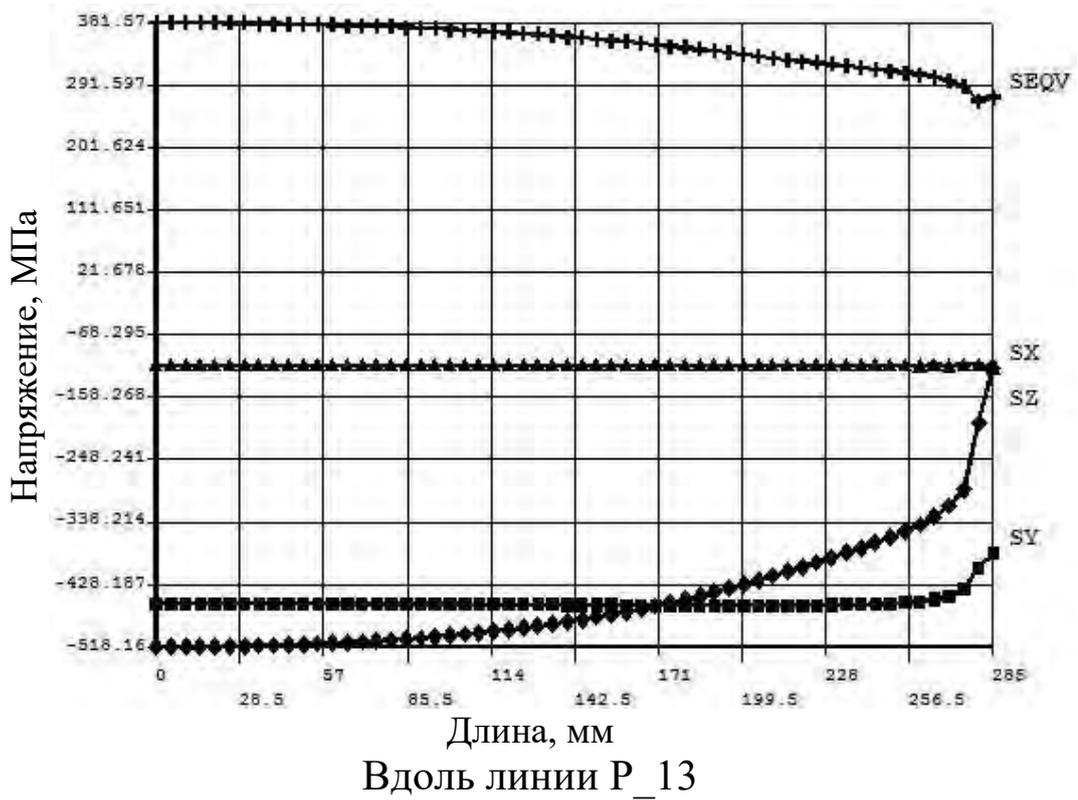


Рисунок 4.27– Характер суммарных напряжений вдоль линий P_13 и P_14 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе

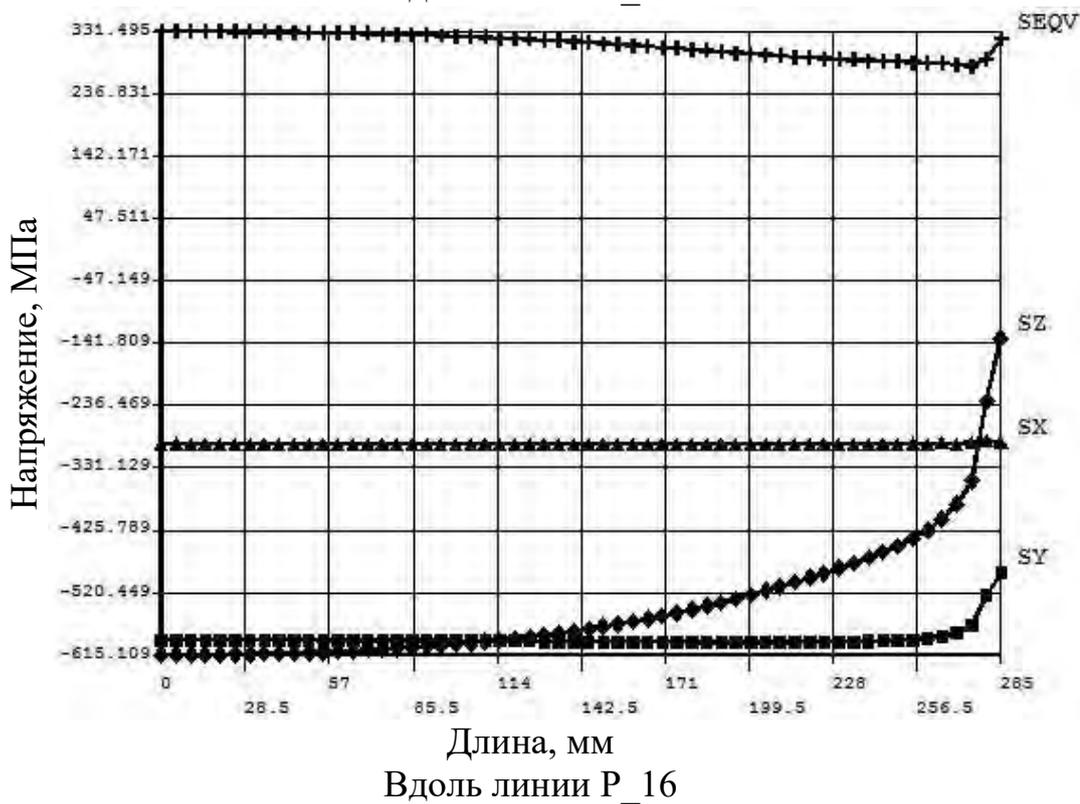
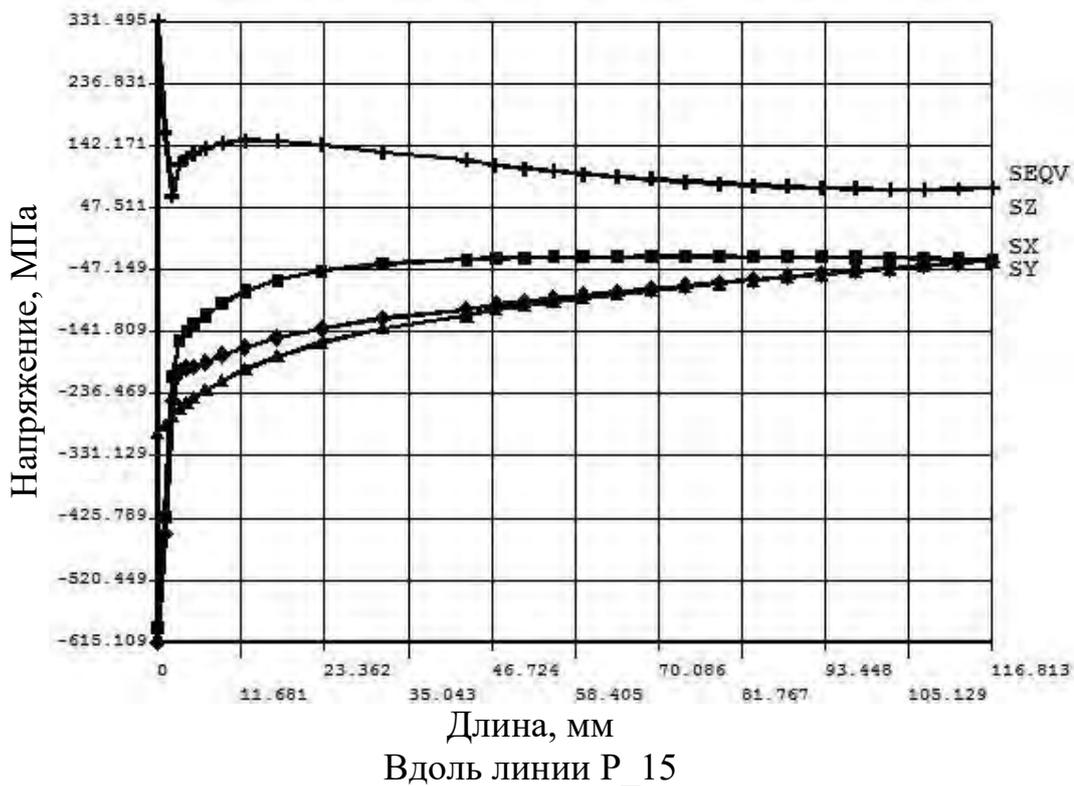


Рисунок 4.29 – Характер суммарных напряжений вдоль линий P_15 и P_16 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе

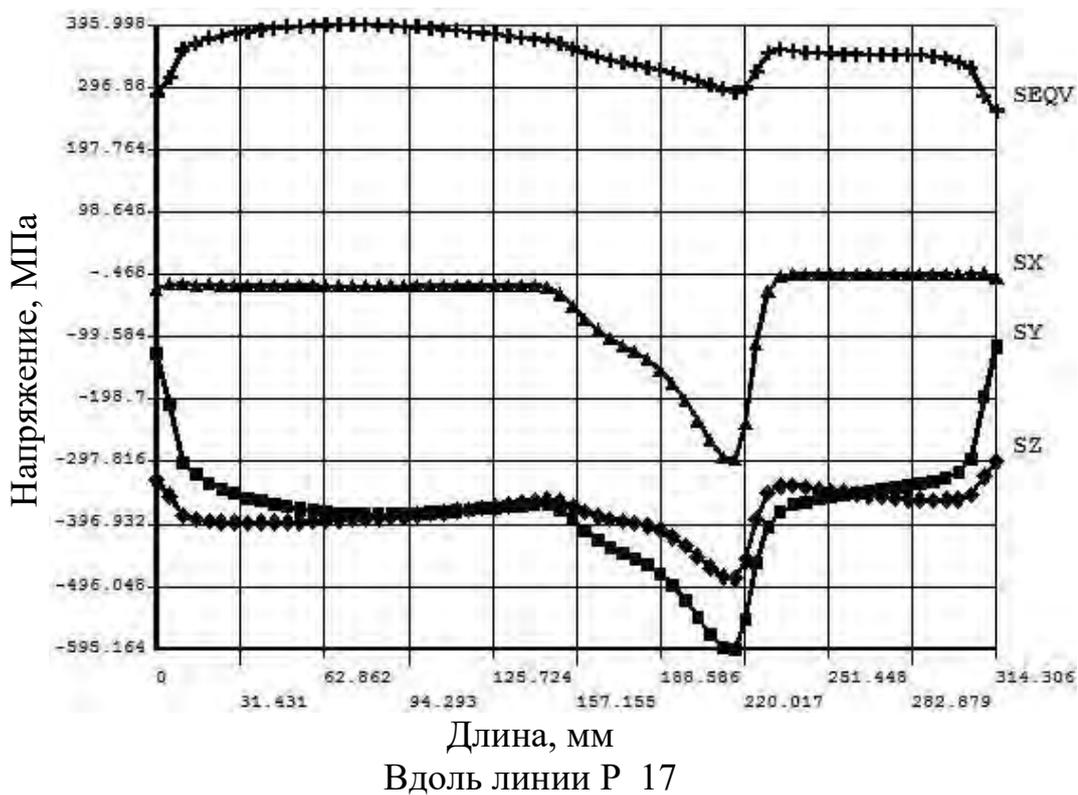


Рисунок 4.30– Характер суммарных напряжений вдоль линий P_17 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе.

Таблица 4.13– Распределение суммарных напряжений по толщине и высоте стенки-бойка без каналов при обжатии заготовки. Охлаждение стенки-бойка водой. Плотность теплового потока 10 МВт/(м²·К)

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	кп	тс	кп	тс	кп	тс	кп	тс
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1, P1	-24	-109	-135	-49	-395	-73	345	173
2, P2	-18	0	-383	-36	-474	-36	437	42
4, P3	-113	-38	-458	-38	-518	-38	381	81
5, P4	-5	-242	-123	-21	-362	-55	319	217
1, P5	-21	-144	-128	-21	-327	-41	284	146
2, P6	-22	-22	-366	-22	-366	-22	371	76
4, P7	-116	-68	-457	-15	-394	-15	321	113
5, P8	-8	-224	-114	-19	-298	-47	260	204
линия P9	-28	-294/4	-134	-592/-116	-401	-615/-366	345	345

Окончание таблицы 4.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9
линия P10	-39	-253/ -39	37	-136/36	-78	-195/ -59	77	135
2, P11	-78	-18	-383	-291	-474	-109	437	255
2, P12	-7	-7	-30	-16	-100	46	85	57
4, P13	-114	-114	-398	-379	-518	-114	363	292
4, P14	-114	-149	-114	-79	-149	43	123	202
3, P15	-301	-47	-595	-47	-470	-47	331	80
3, P16	-300	-300	-596	-488	-615	-141	331	331
линия P17	-25	-297/0	-124	-595/ -99	-330	-496/ -297	300	345

Рисунок 4.26 характеризует распределение осевых суммарных напряжений как по высоте стенки-бойка без каналов, так и по толщине приконтактного слоя при обжатию заготовки. Наибольших значений эти напряжения достигают в зоне очага циклической деформации, в частности напряжение в направлении оси Z на контактной поверхности равно минус 615 МПа, затем по толщине приконтактного слоя стенки-бойка снижается и достигает величины минус 195 МПа. Такой же характер распределения имеют и суммарные напряжения в направлении осей X и Y .

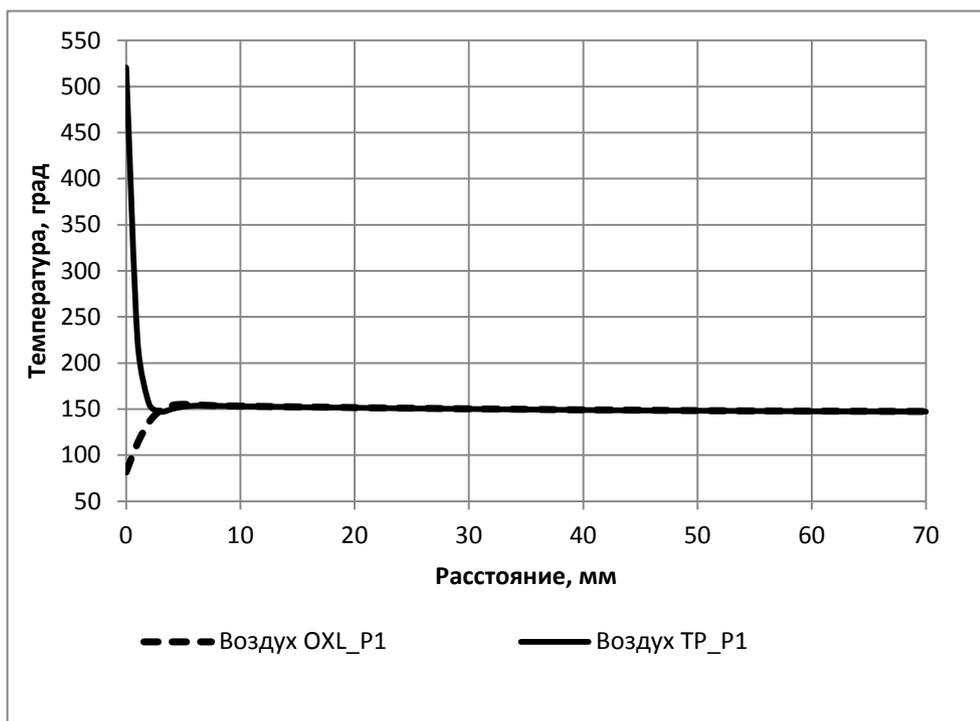
Рисунок 4.29 характеризует закономерность распределения осевых суммарных напряжений по толщине (линия P15) и по ширине (линия P16) стенки-бойка без каналов в сечении 3. Эти напряжения имеют наибольшую величину на оси симметрии стенки-бойка без каналов, а затем по его толщине и ширине они снижаются.

4.8. Напряженное состояние стенки-бойка без каналов установки при охлаждении его боковых поверхностей воздухом при получении листов из стали

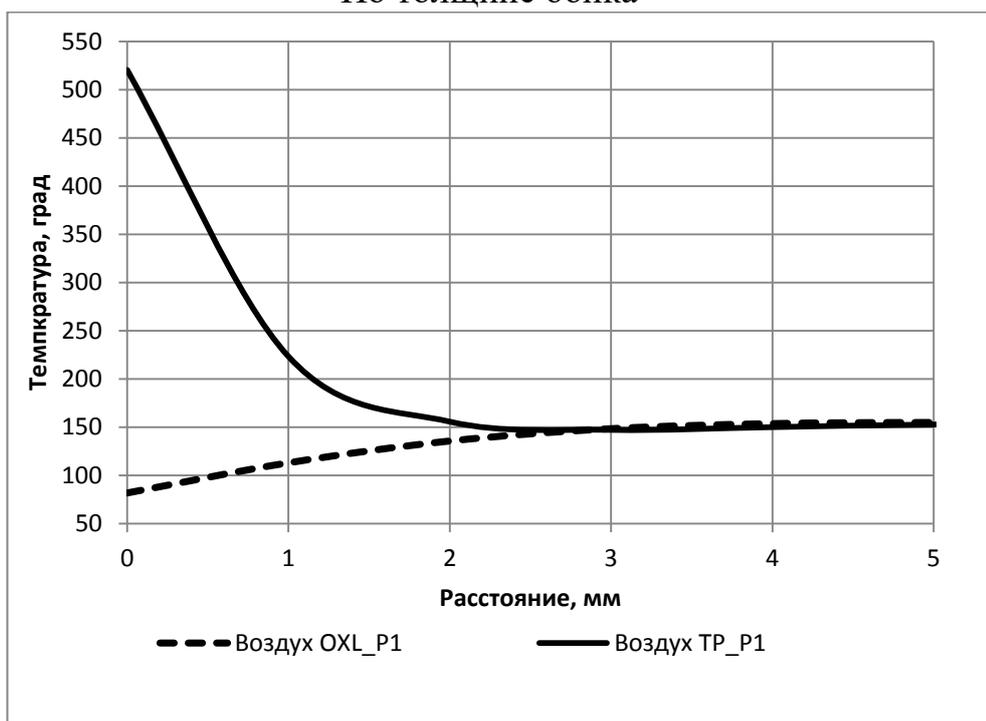
4.8.1. Температурное поле стенок бойков без каналов

На рисунках 4.31 и 4.32 показано распределение температур по толщине стенки-бойка и приконтактного слоя от поверхности контакта вглубь на 5 мм (вариант 3). Из рисунка следует, что от воздействия теплового потока и последующего охлаждения стенок-бойков водой максимальная температура на поверхности контакта при обжати заготовки достигает величины порядка 520 °С, затем на глубине 2,5 мм она снижается до 150 °С.

Следует отметить, что характер изменения температуры по ширине стенки-бойка практически не меняется и на боковой части стенки-бойка (рис. 4.32) и он подобен изменению температуры по оси симметрии стенки-бойка. Температуры приведены на нескольких линиях. Поскольку изменения температур по другим линиям подобно.

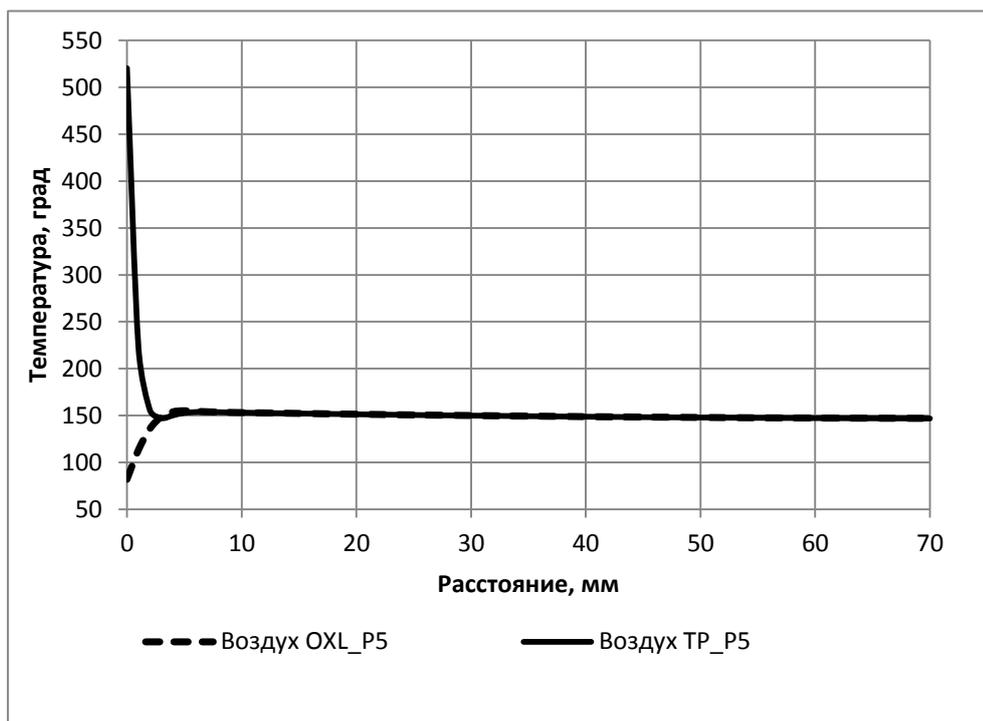


По толщине бойка

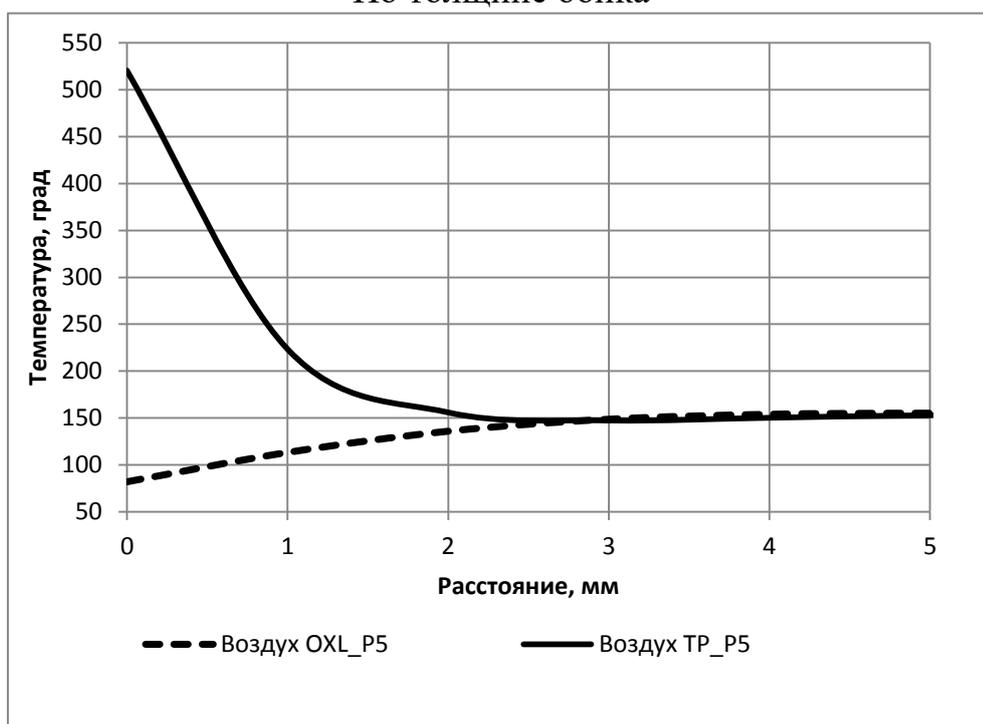


От поверхности контакта вглубь на 5мм

Рисунок 4.31 – Характер температур вдоль линии P_1 от воздействия на боек теплового потока (ТП) и охлаждения водой (ОХЛ). Вариант 3 - охлаждение бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом



По толщине бойка



От поверхности контакта вглубь на 5мм

Рисунок 4.32 – Характер температур вдоль линии P_5 от воздействия на боек теплового потока (ТП) и охлаждения водой (ОХЛ). Вариант 3 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом

4.8.2. Распределение термоупругих напряжений по толщине приконтактного слоя стенки бойка без каналов при обжати заготовки и на холостом ходу

Характер распределения термоупругих напряжений по толщине приконтактного слоя, высоте и ширине стенки-бойка при обжати заготовки и на холостом ходу дан в таблице 4.14 и на рисунках 4.33 – 4.40. Наибольшие сжимающие термоупругие напряжения на контактной поверхности стенки-бойка при обжати заготовки возникают в направлении осей Y и Z и соответственно достигающие минус 730 МПа и минус 767 МПа. Затем по толщине приконтактного слоя стенки-бойка они резко снижаются и даже в некоторых сечениях по высоте стенки-бойка становятся растягивающими величиной до 80 МПа (таблица 4.14).

Однако наибольшие растягивающие термоупругие напряжения на контактной поверхности стенок бойков возникают на холостом ходу в направлении осей Y и Z величиной 178÷186 МПа, при этом охлаждение боковых стенок бойков суппортов осуществляется воздухом. Далее по толщине приконтактного слоя стенки-бойка они становятся сжимающими величиной до минус 31 МПа (таблица 4.14, рисунки 4.33 – 4.40).

Таблица 4.14 – Напряженное состояние стенки-бойка без каналов от воздействий температурного поля при обжати заготовки и на холостом ходу. Охлаждение боковых поверхностей стенки-бойка воздухом

№ сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	тр	охл	тр	охл	тр	охл	тр	охл-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1, P1	-42	-9	-250	44	-626	133	542	115
2, P2	-43	8	-727	174	-767	180	760	180
4, P3	-7	-2	-695	178	-745	178	730	178
5, P4	12	1	-212	37	-603	134	525	118
1, P5	-39	8	-262	44	-597	141	517	124

Окончание таблицы 4.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2, P6	-44	9	-728	175	-728	186	736	186
4, P7	0	-22	-700	174	-708	184	708	184
5, P8	-13	2	-230	39	-573	141	498	124
P9*	-53	6	-259	45	-615	133	530	113/180
P10*	-27	27	10	-9	-35	-37	87	43/27
2, P11	-38	7	-716	177	-767	186	760	180
2, P12	15	-2	0	-21	-14	84	15	28/36
4, P13	-7	0	-730	175	-745	175	730	181/129
4, P14	15	-6	15	-17	-5	-31/-10	19/78	20/31

* - по высоте

4.8.3 Суммарное напряженное состояние стенки-бойка от усилия обжатия и температурной нагрузки при охлаждении стенки-бойка воздухом

Для оценки напряженного состояния стенок-бойков при охлаждении их воздухом вместо воды проведены специальные расчеты, Результаты которых приведены в таблицах 4.15 и 4.16 и на рисунках 4.41 – 4.49 . Представленные в таблице 4.15 результаты (линии P1-P8) характеризуют распределение осевых суммарных напряжений по толщине стенки-бойка при охлаждении его воздухом.

Из приведенных данных следует, что осевые суммарные напряжения являются сжимающими и по толщине стенки-бойка распределяются крайне неравномерно. Максимальной величины осевые суммарные напряжения возникают на контактной поверхности стенки-бойка и затем они существенно уменьшаются. Наибольшей величины осевые напряжения достигают в направлении осей Y и Z и равной минус 920 МПа. Представляет интерес распределение осевых суммарных напряжений по толщине приконтактного слоя стенки-бойка (линии P9-P14). Так суммарное напряжение в направлении Y на контактной поверхности стенки-бойка возрастает от минус 255 МПа до максимальной величины минус 923 МПа, а

затем уменьшается до величины 255 МПа (линия Р9, таблица 4.15). Такой же характер имеет распределение суммарного напряжения в направлении оси Z.

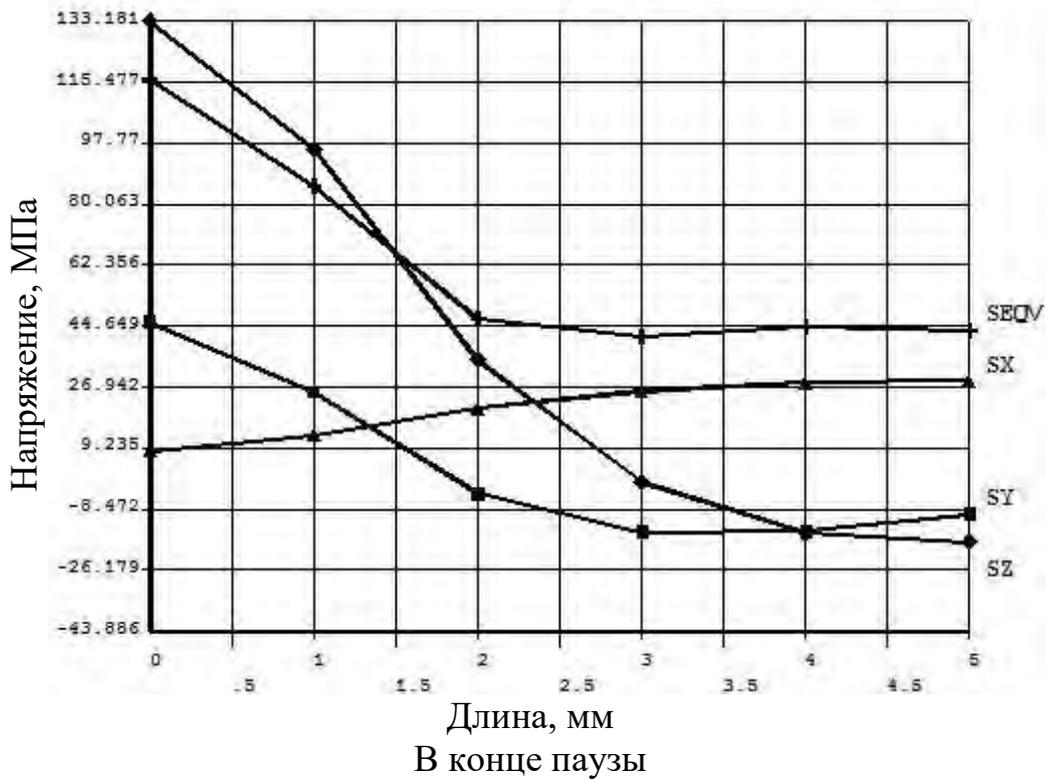
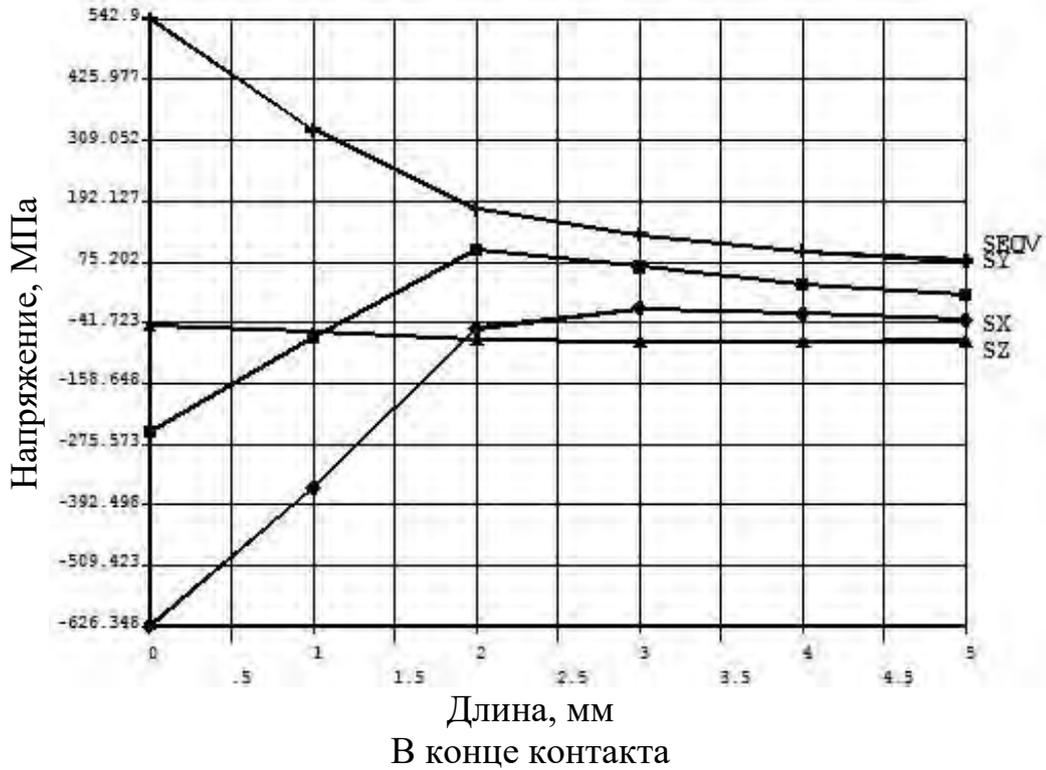


Рисунок 4.33 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий Р_1 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – воздухом.

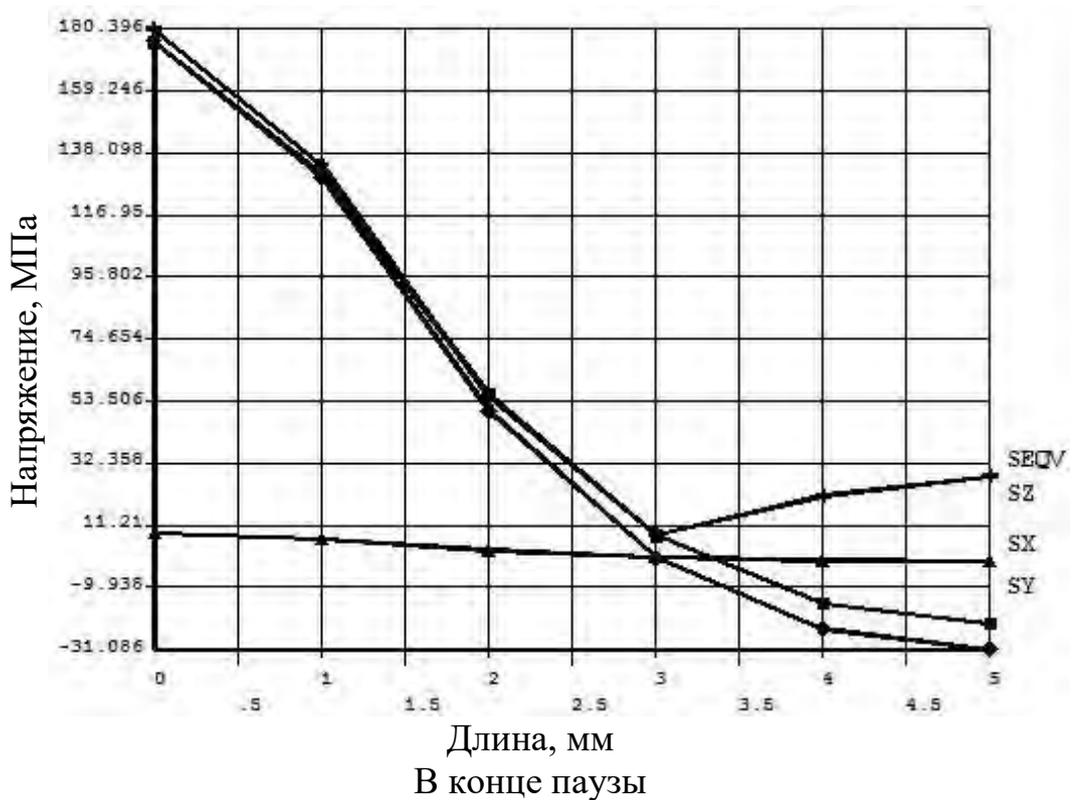
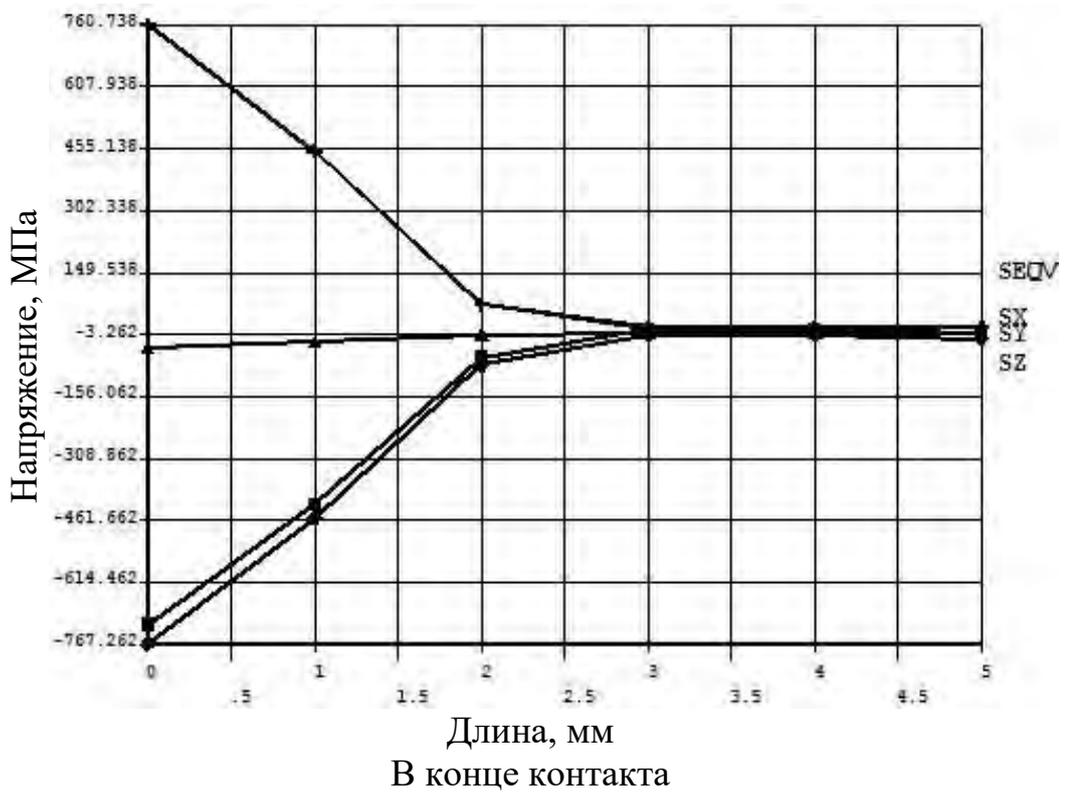


Рисунок 4.34 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_2 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – воздухом

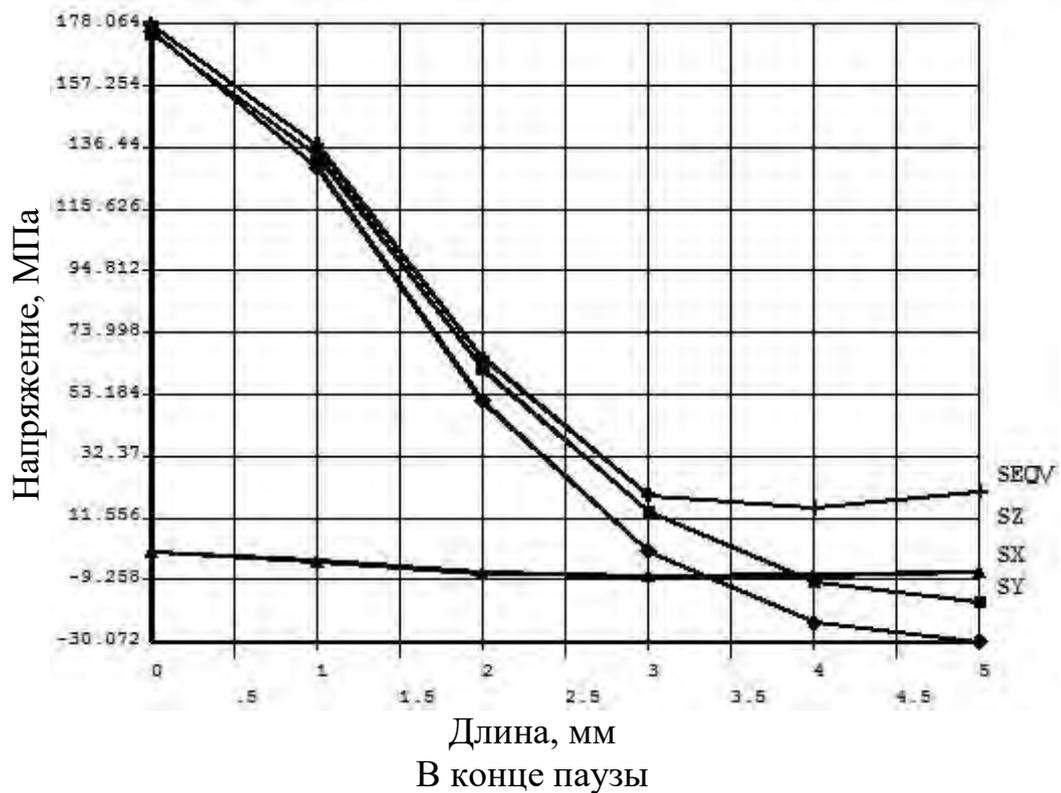
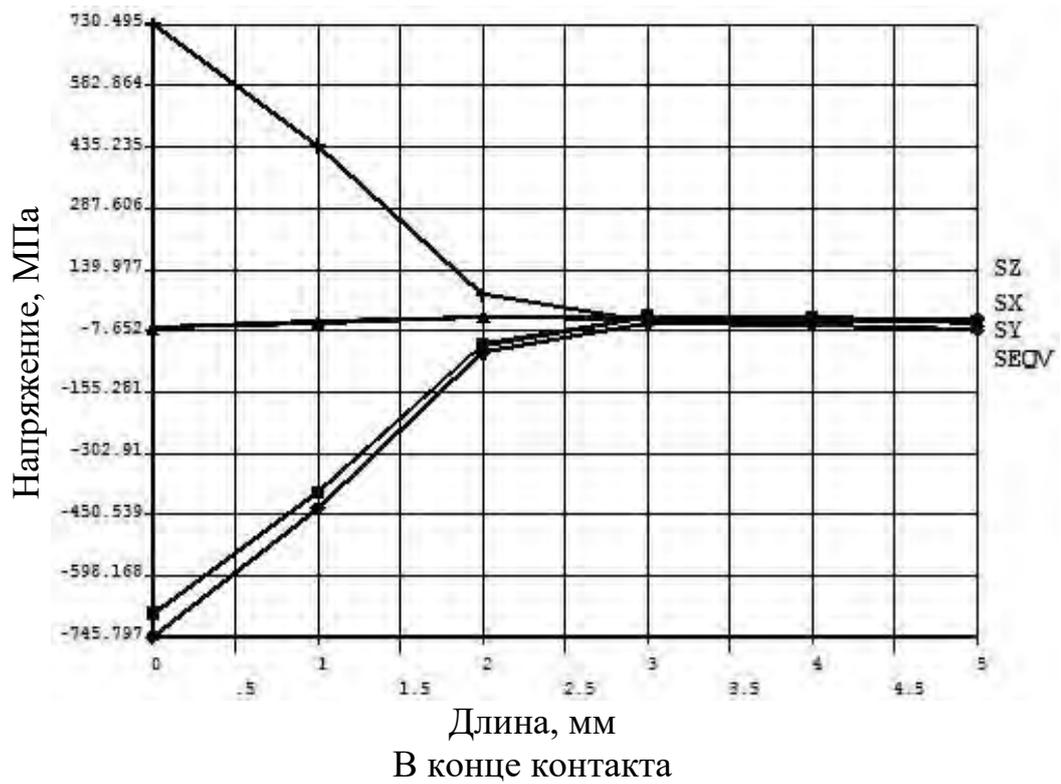


Рисунок 4.35 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_3 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – воздухом

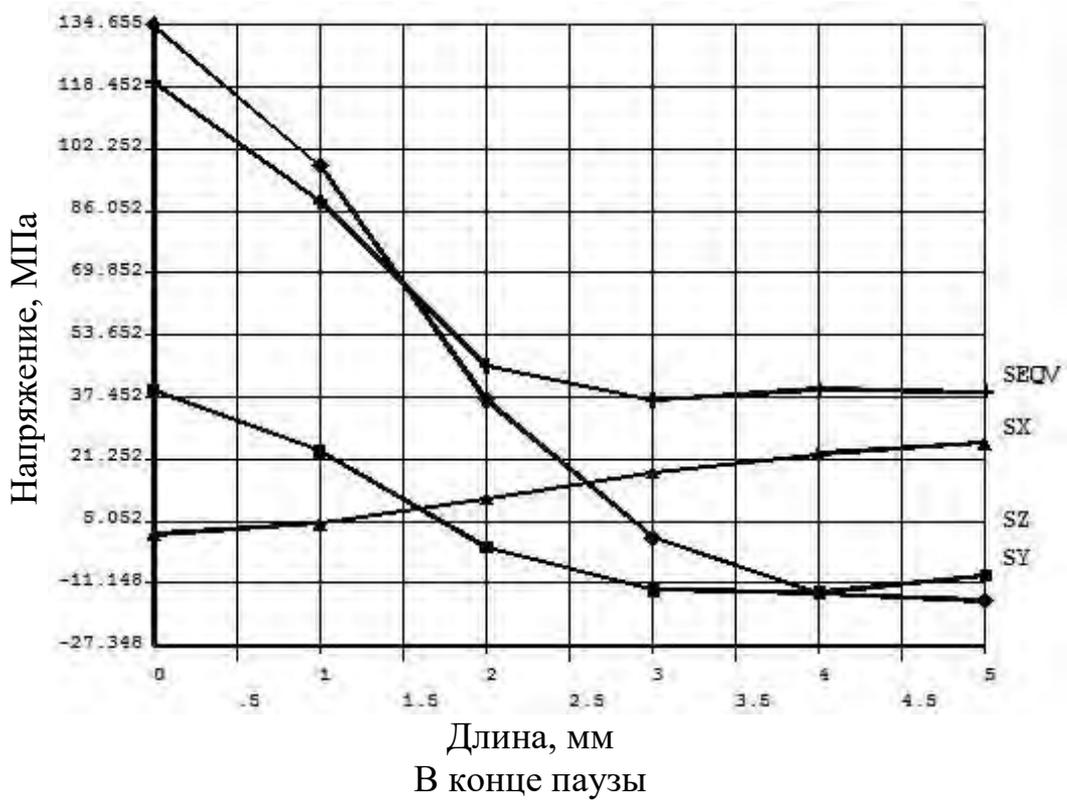
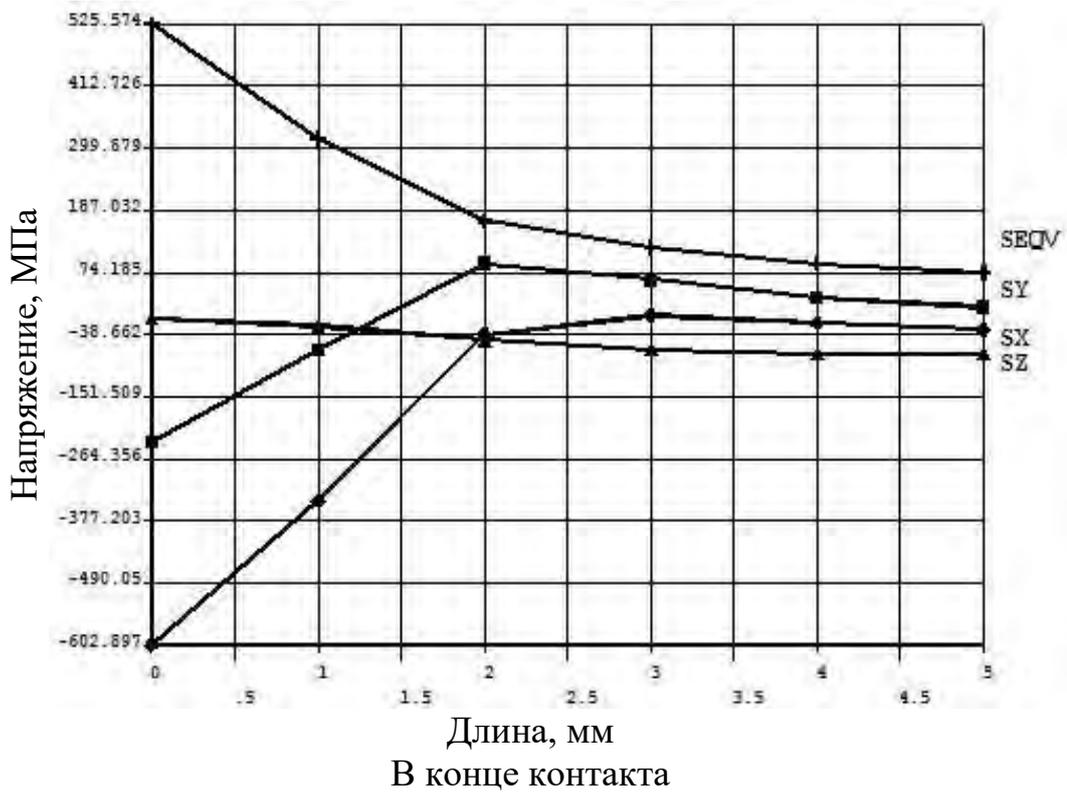


Рисунок 4.36 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_4 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – воздухом.

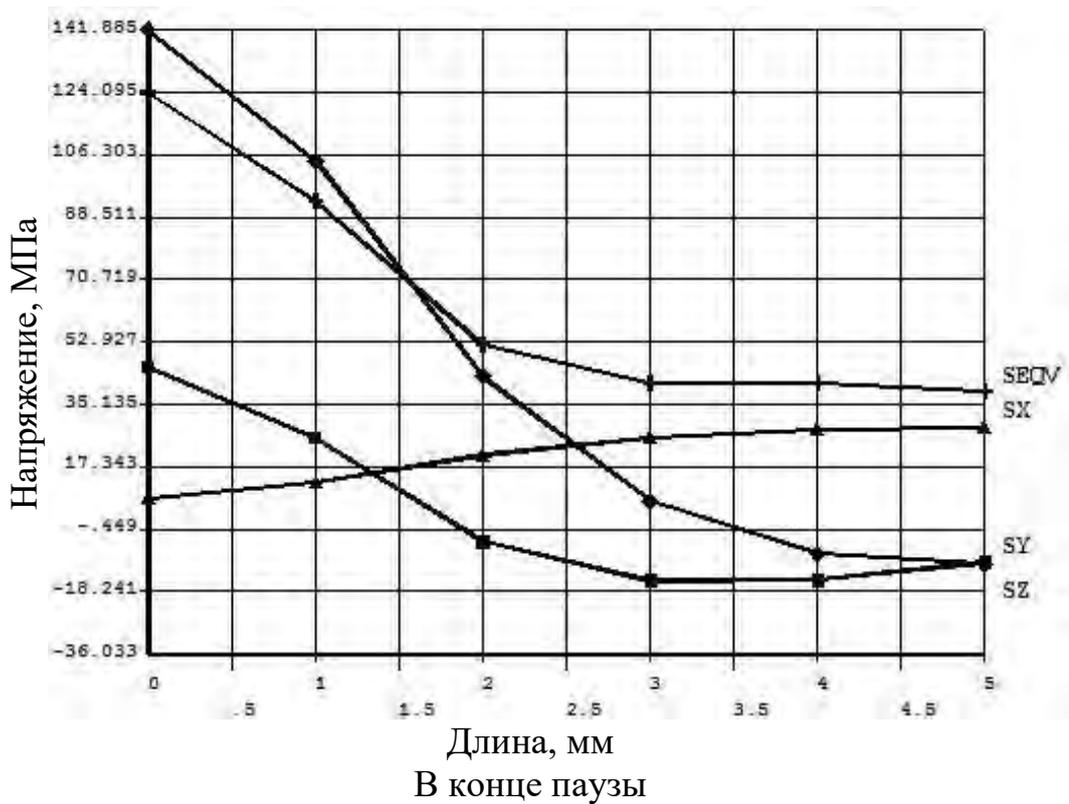
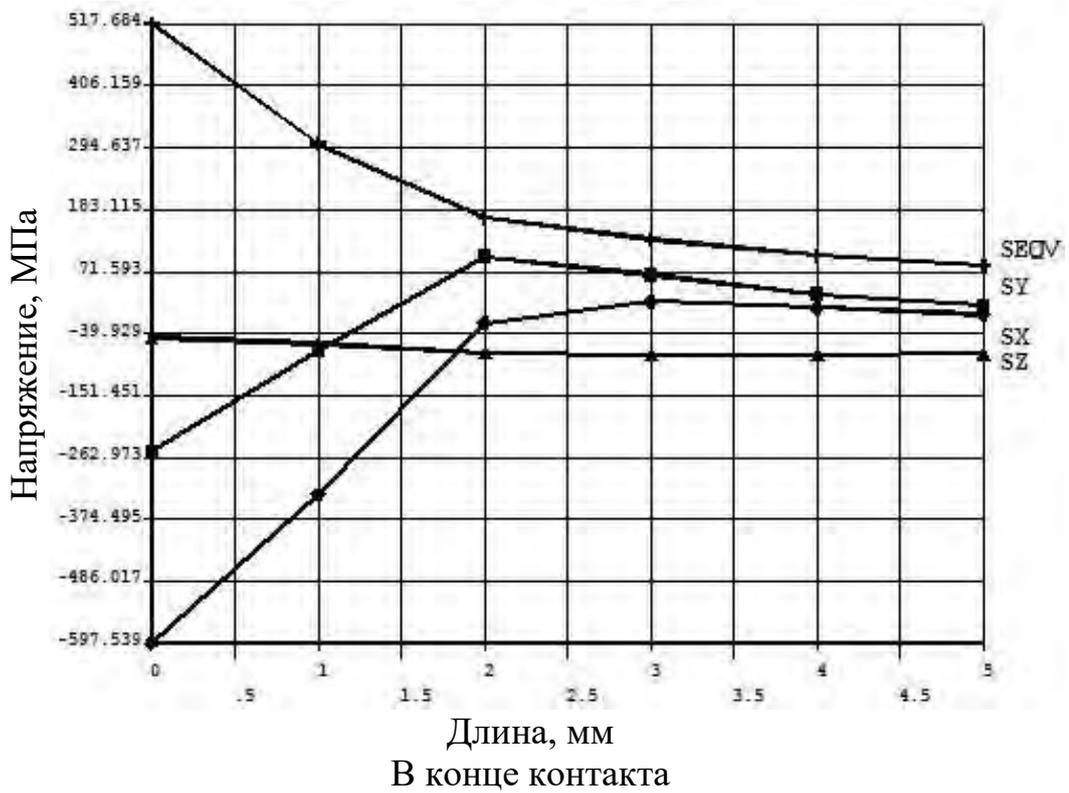


Рисунок 4.37 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_5 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – воздухом.

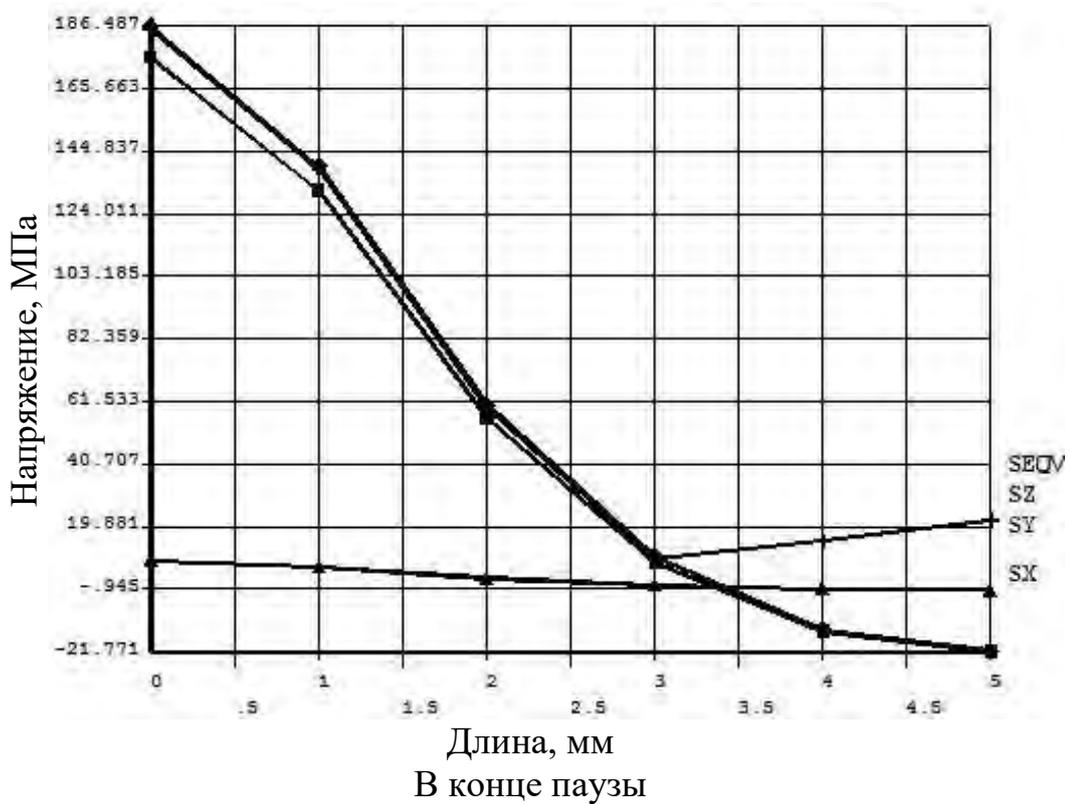
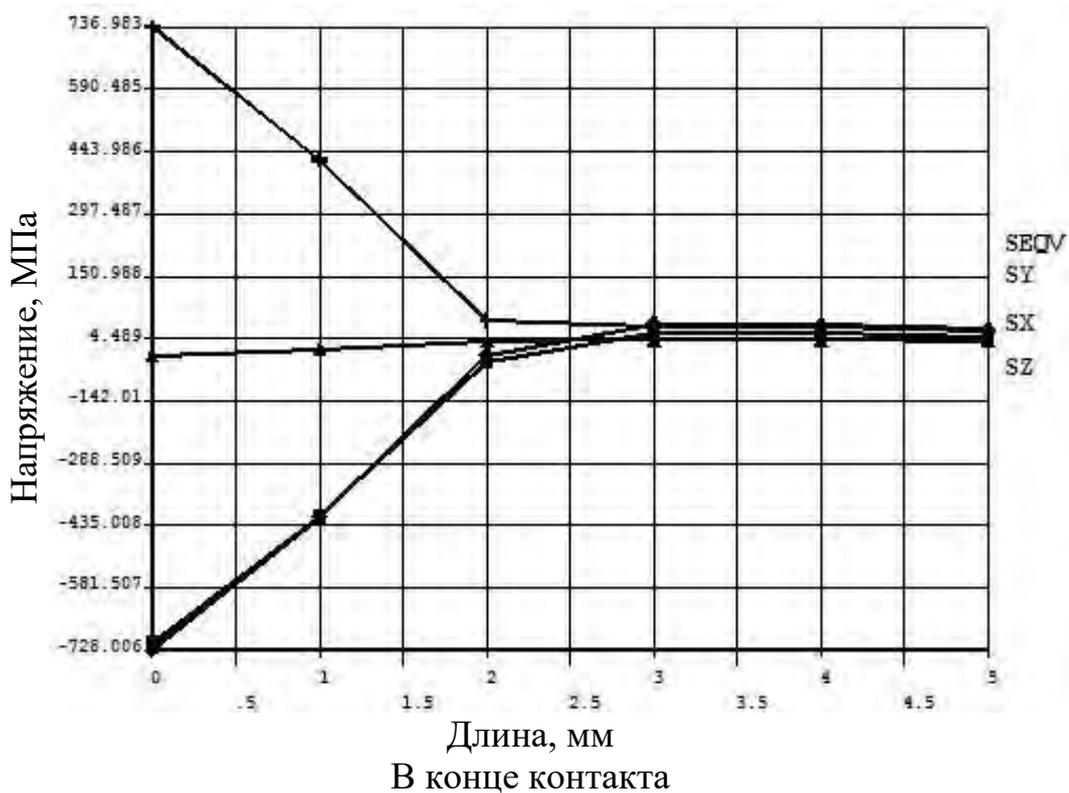


Рисунок 4.38 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_6 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – воздухом.

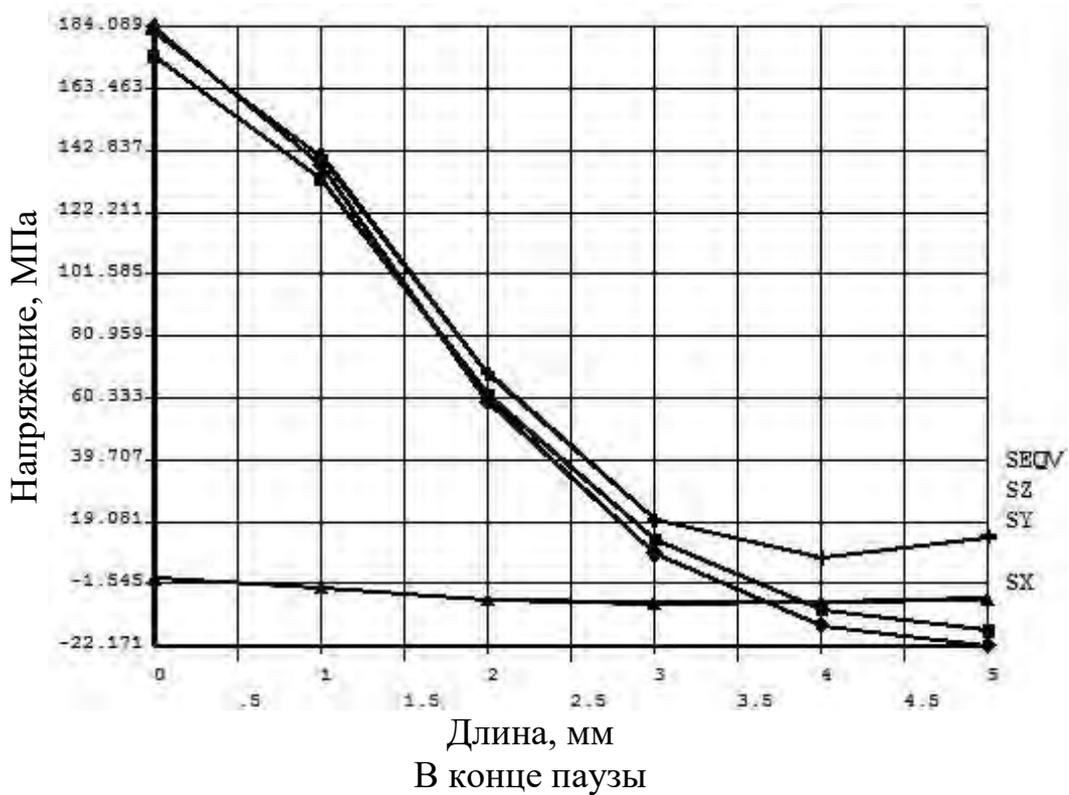
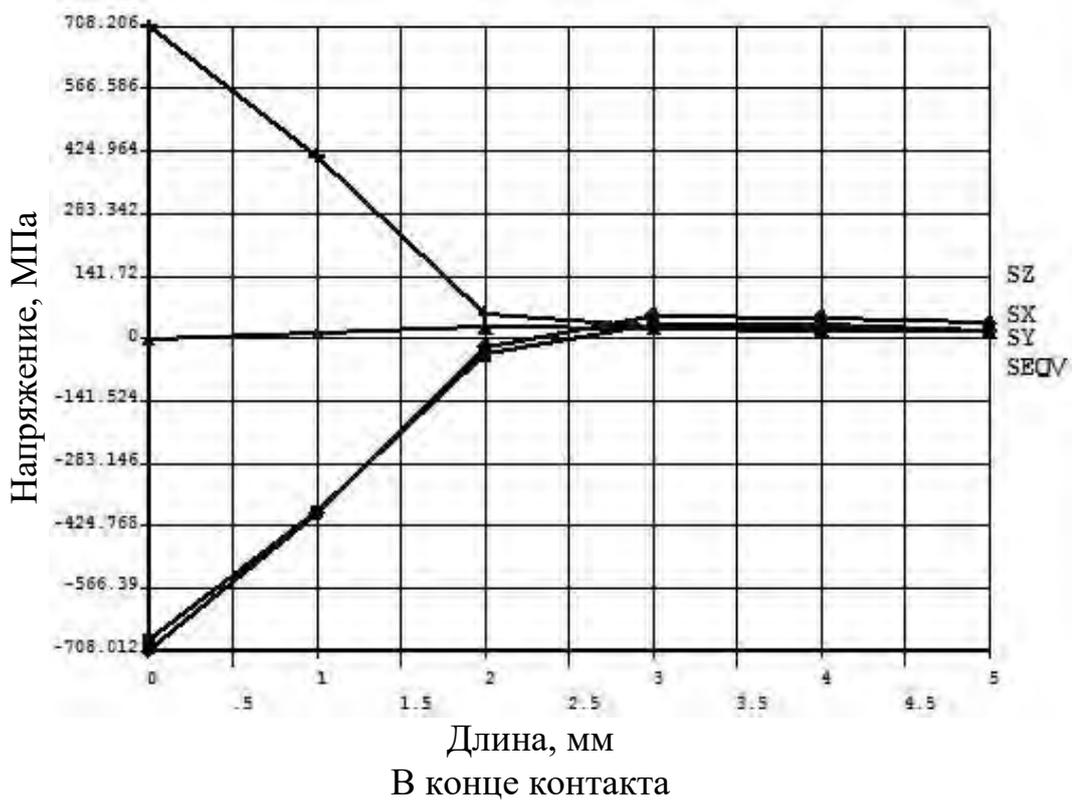


Рисунок 4.39 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_7 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – воздухом.

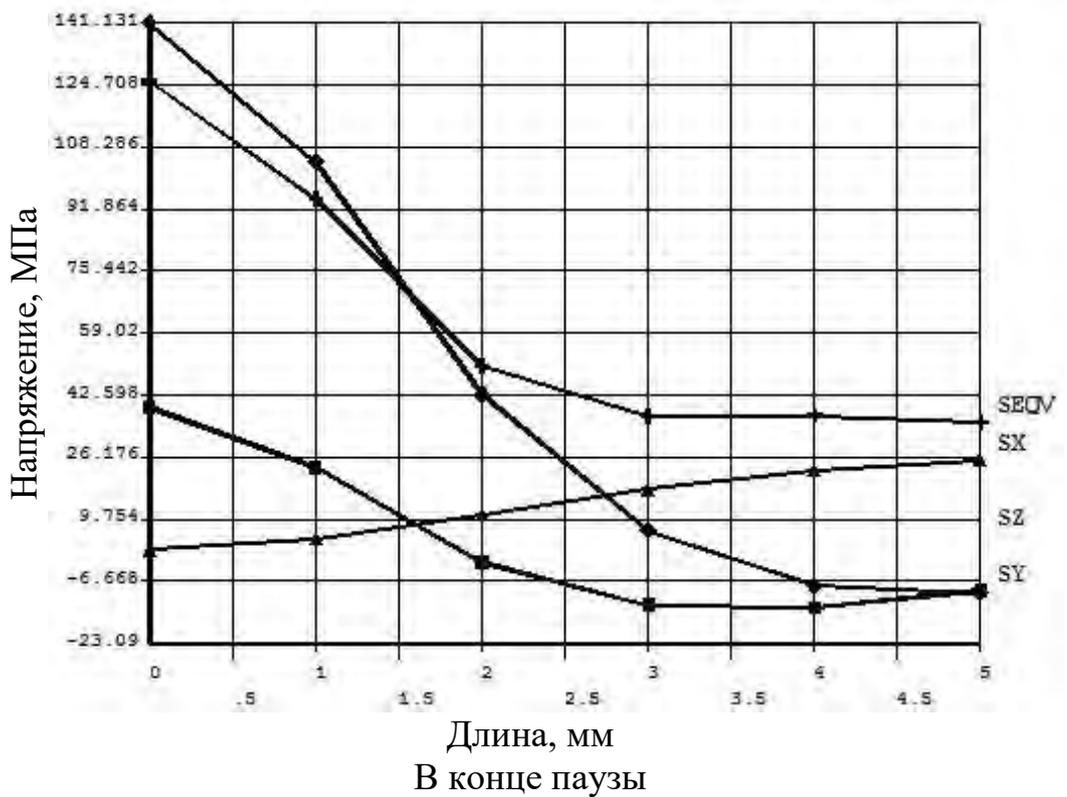
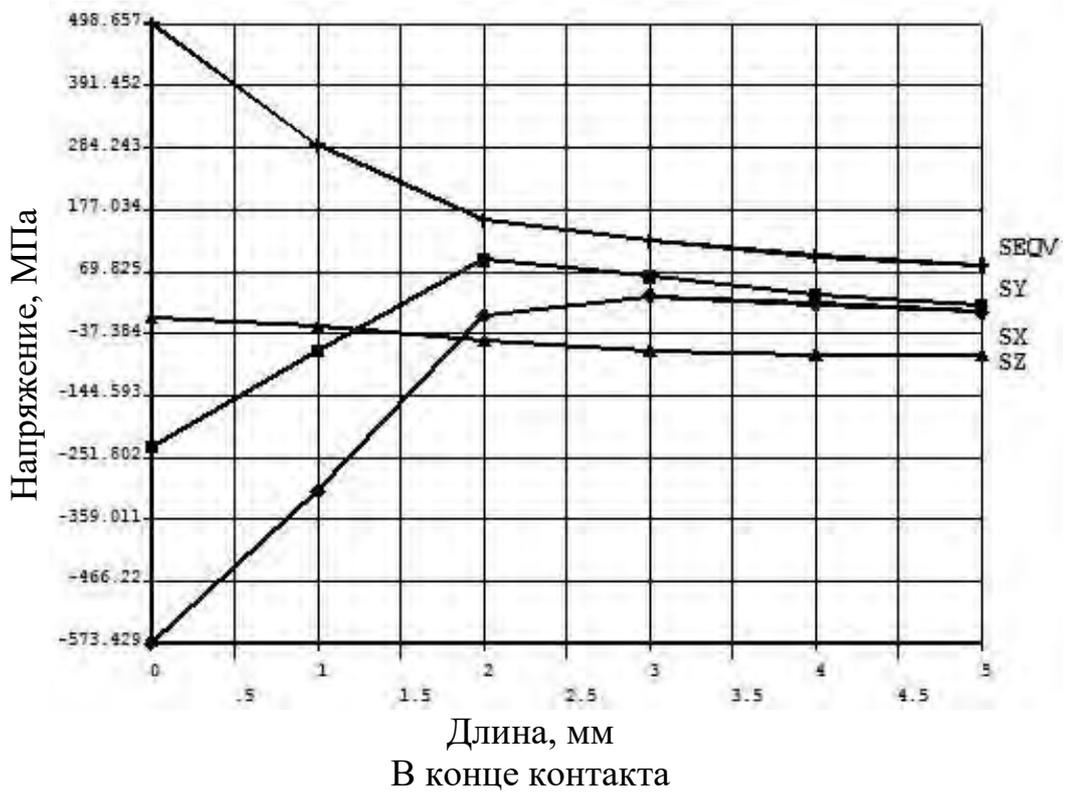


Рисунок 4.40 – Характер термоупругих напряжений вдоль линий P_8 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – воздухом.

Что касается распределения суммарных напряжений по толщине приконтактного слоя стенки-бойка, то максимальной величины в направлении осей Y и Z, равной минус 923 МПа, они достигают на контактной поверхности стенок-бойков, а затем по толщине приконтактного слоя толщиной 5 мм они резко снижаются до величин минус 90÷119 МПа (таблица 4.16).

Распределение суммарных напряжений по толщине приконтактного слоя стенки-бойка, на контактной поверхности, как видно из рисунка 4.49 (линия 17) крайне неравномерно, особенно в направлении осей Y и Z. В частности, суммарное напряжение в направлении оси Y, на контактной поверхности, равное минус 262 МПа, в области очага деформации возрастает до минус 920 МПа, а затем снижается до минус 262 МПа.

Аналогичный характер распределения по высоте стенки-бойка имеет и суммарное напряжение и в направлении оси Z (таблица 4.15, рисунки 4.41 – 4.49)

Таблица 4.15 – Суммарное напряженное состояние стенки-бойка без каналов от воздействий температурного поля и усилия обжатия. Охлаждение боковых поверхностей стенки-бойка воздухом

№ сечения,	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	ос	тс	ос	тс	ос	тс	ос	тс
1, P1	-61	-41	-250	-21	-566	-71	542	51
2, P2	-59	-9	-704	-9	-755	-9	736	17
4, P3	-130	-56	-803	-47	-803	-56	690	53
5, P4	-78	-150	-237	-32	-597	-58	520	128
1, P5	-60	-64	-263	-34	-598	-40	519	66
2, P6	-46	-28	-676	-28	-704	-28	704	36
4, P7	-112	-62	-781	-32	-743	-32	656	90
5, P8	-37	-144	-230	-30	-572	-58	497	128

Таблица 4.16 - Распределение суммарных напряжений по толщине приконтактного слоя стенки-бойка без каналов при контакте с полосой. Охлаждение боковых поверхностей стенки–бойка воздухом

№ сечения,	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	ос	пс	ос	пс	ос	пс	ос	пс
P9*	-33	-311/ -4	-255	-923/ -255	-626	-923/ -589	550	521
P10*	-36	-253/ 77	85	-109/9	-79	-253/ -25	77	160/77
2, P11	-45	-45	-704	-555	-755	-210	736	458
2, P12	-9	25/-76	16	49/-8	-9	92/13	24	83
4, P13	-130	-130	-803	-654	-803	-235	630	504
4, P14	-126	-78/ 180	-90	-50/ -98	-67	85/14	130	228
3, P15	-323	-57	-923	-31	-923	-37	651	52
3, P16	-344	-344	-924	-766	-924	-241	651	494
P17*	-65	-320/ 13	-262	-920/ 263	-591	-838/ -591	520	510

* - по высоте

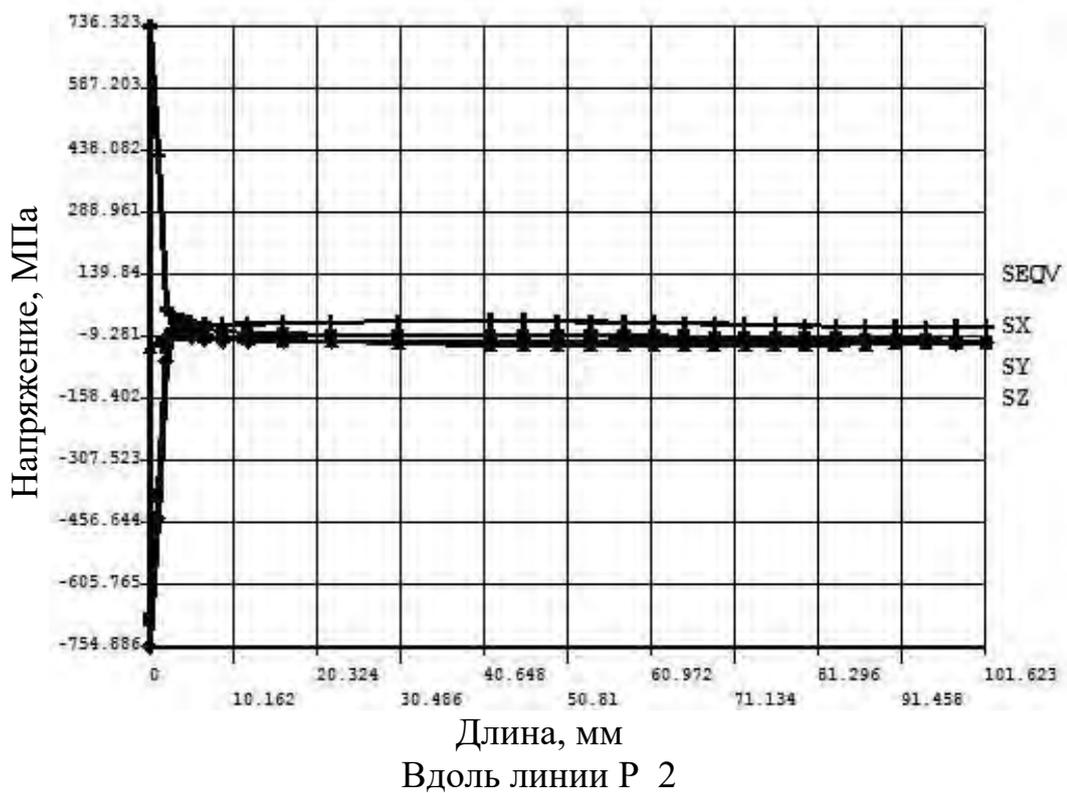
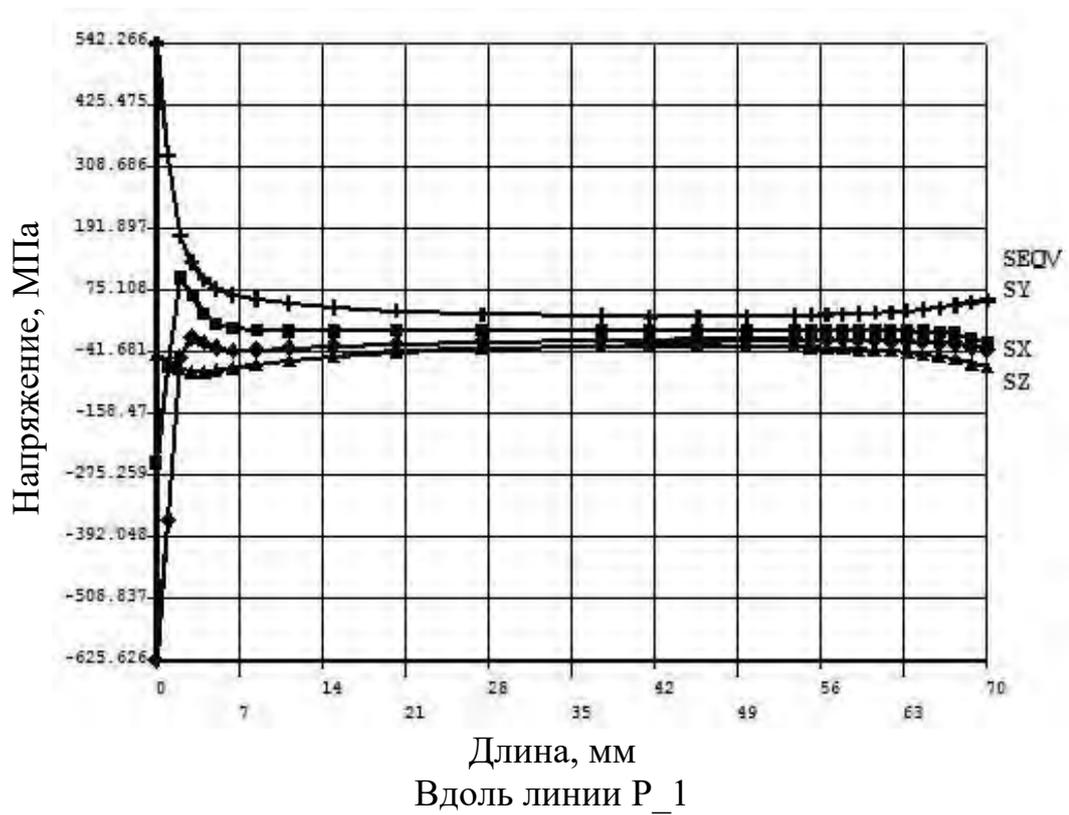


Рисунок 4.42 – Характер напряжений вдоль линий P_1 и P_2 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 2 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом

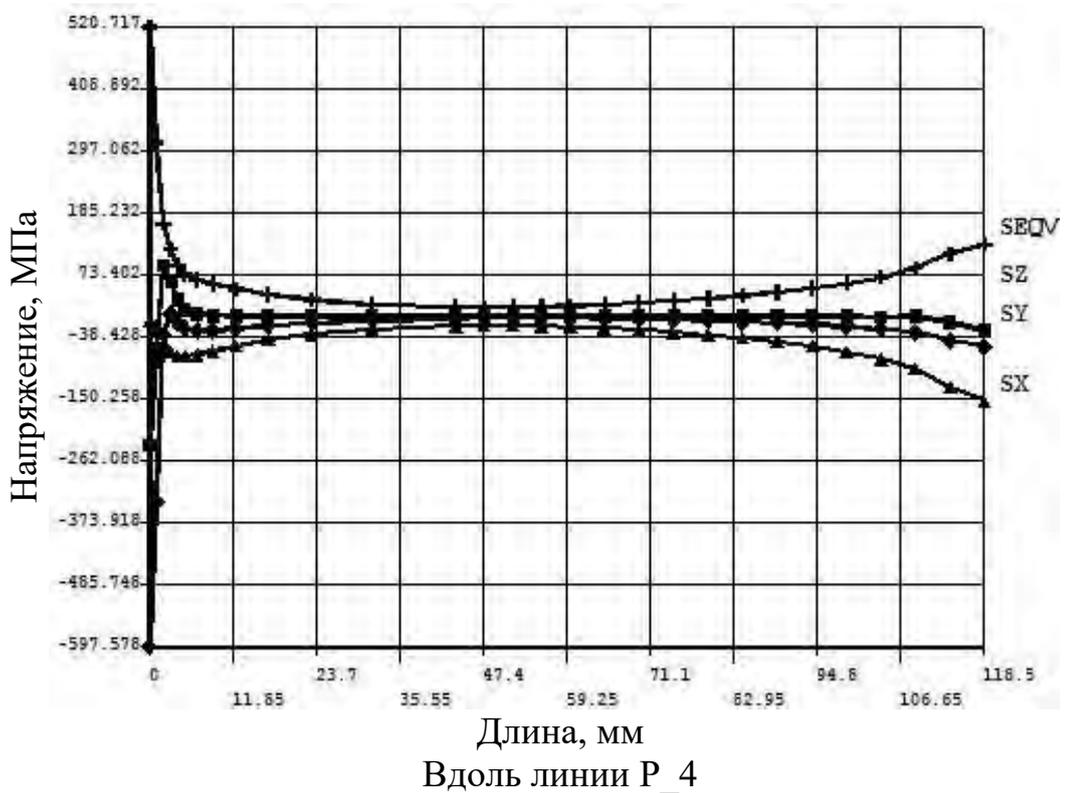
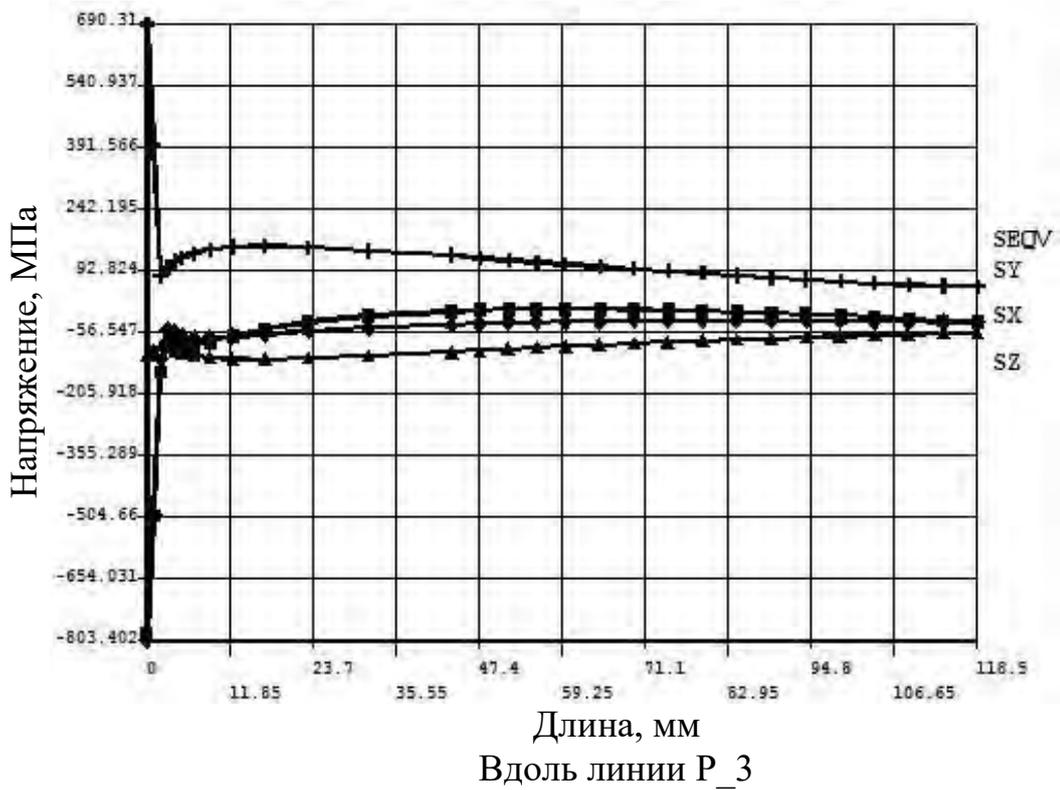


Рисунок 4.42 – Характер напряжений вдоль линий P_3 и P_4 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 2 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом

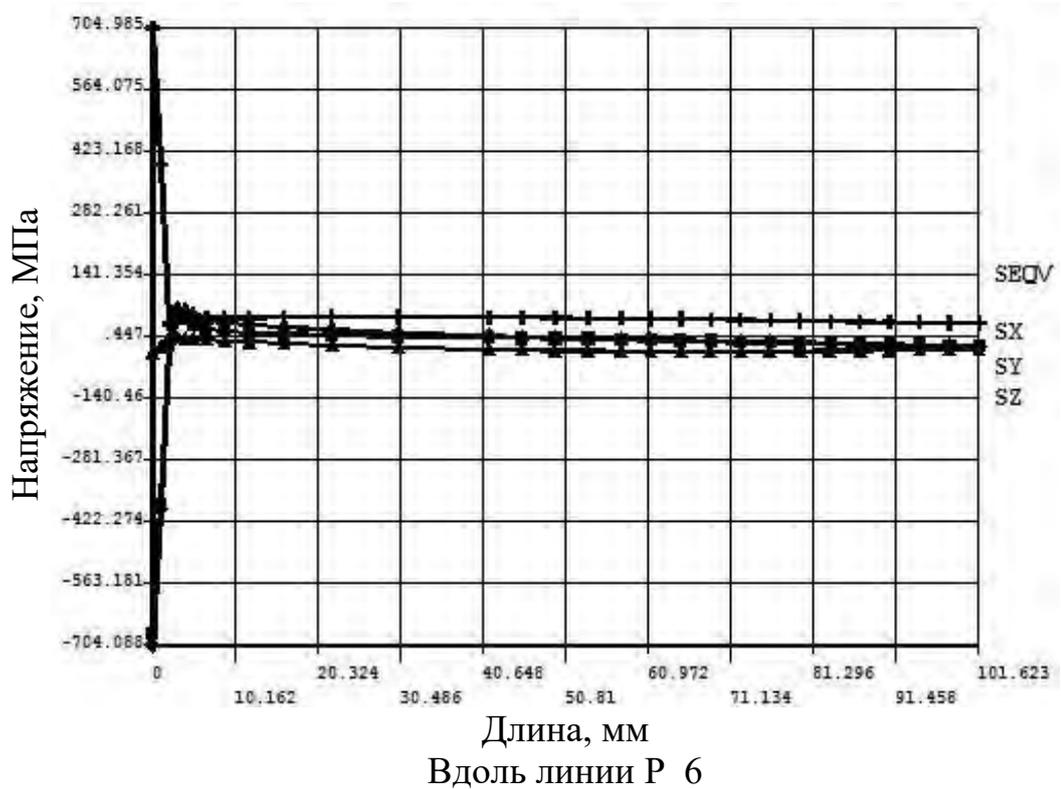
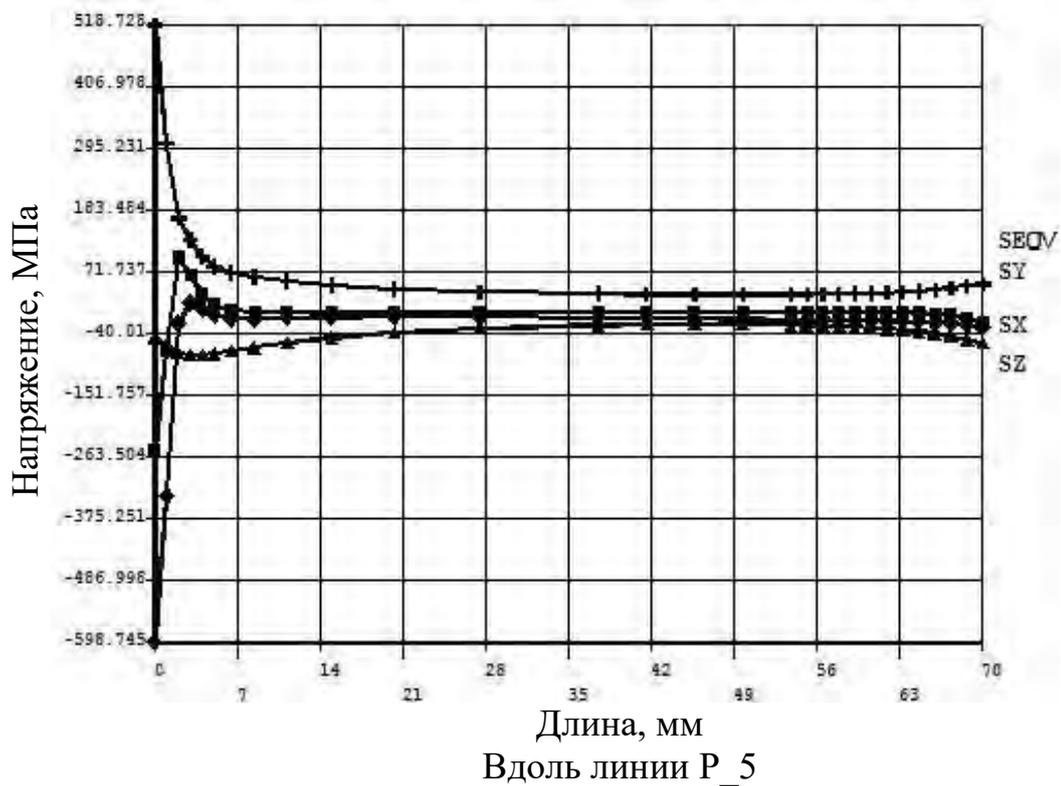


Рисунок 4.43 – Характер напряжений вдоль линий P_5 и P_6 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 2 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом

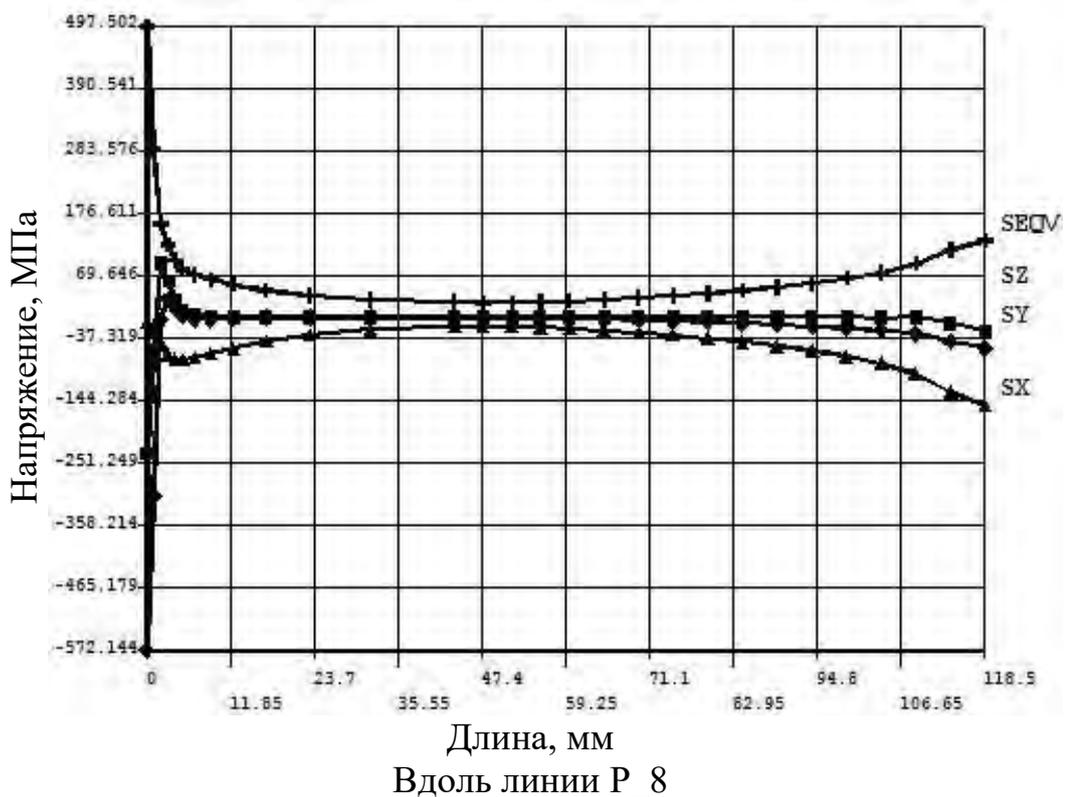
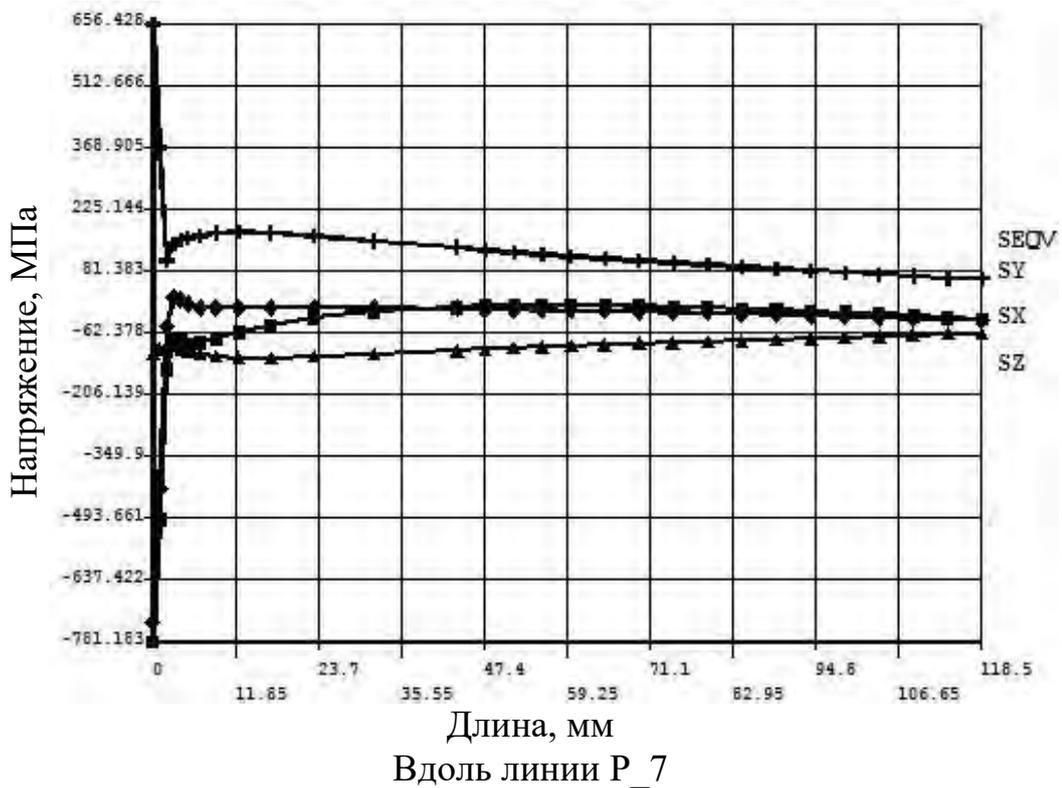


Рисунок 4.44 – Характер напряжений вдоль линий P_7 и P_8 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 2 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом.

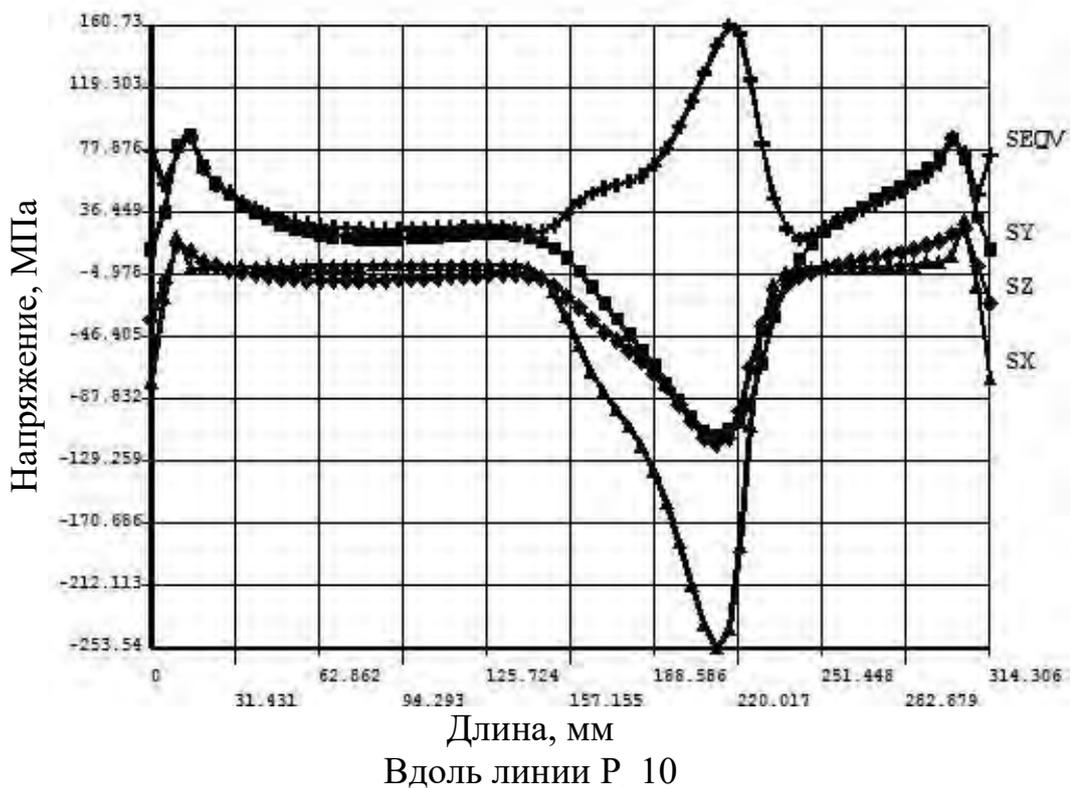
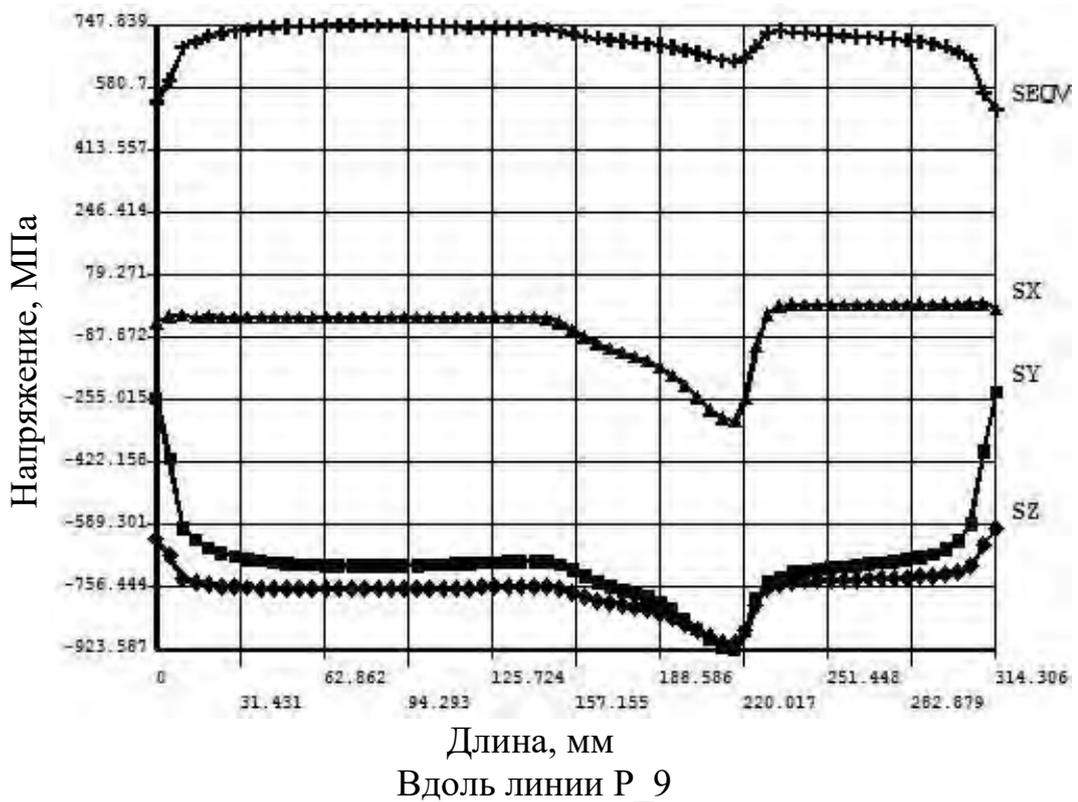


Рисунок 4.45 – Характер напряжений вдоль линий P_9 и P_10 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 2 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом.

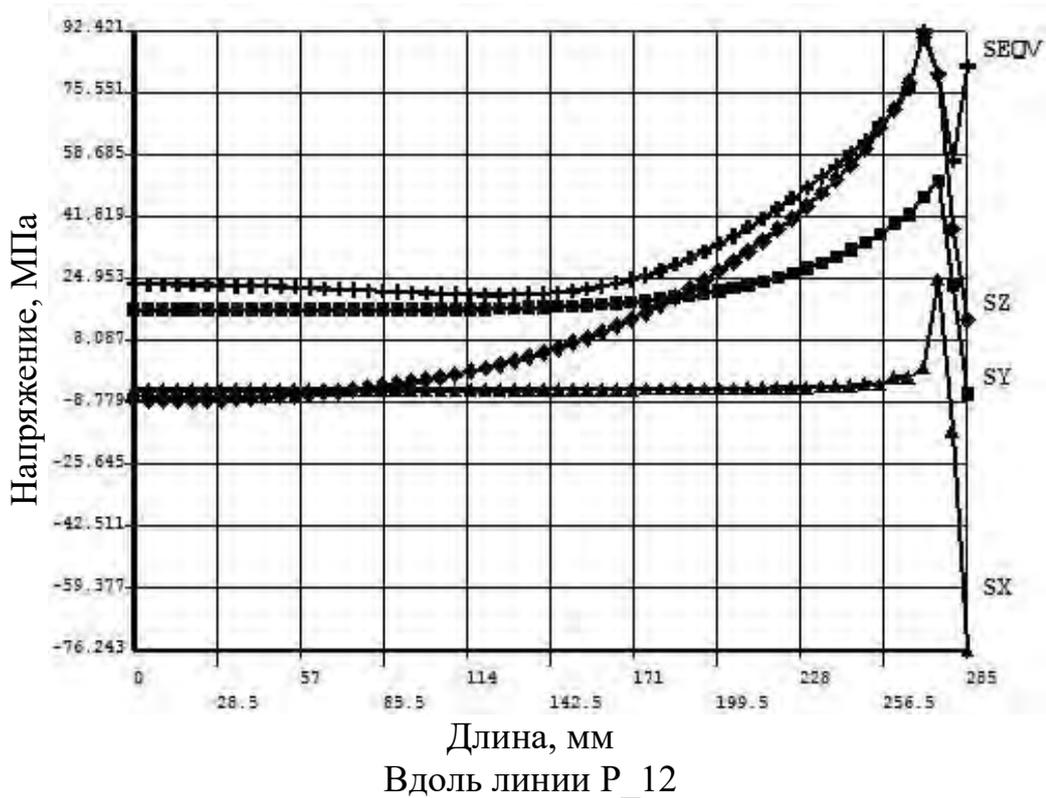
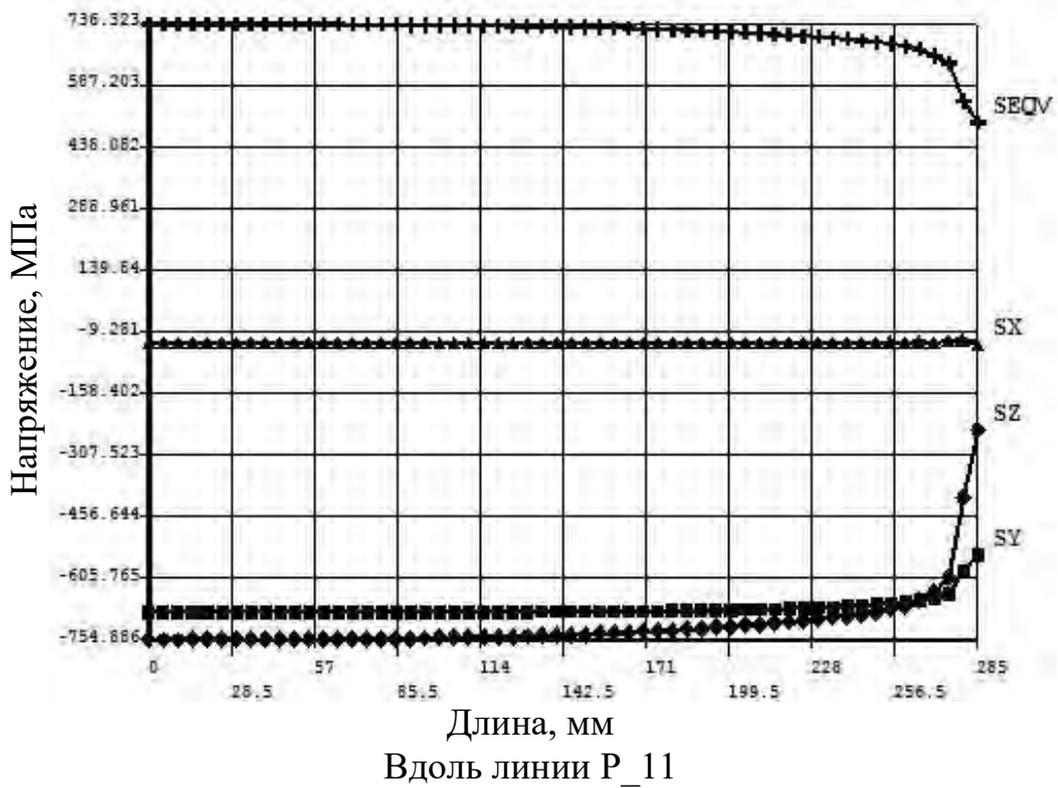


Рисунок 4.46 – Характер напряжений вдоль линий P_11 и P_12 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 2 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом

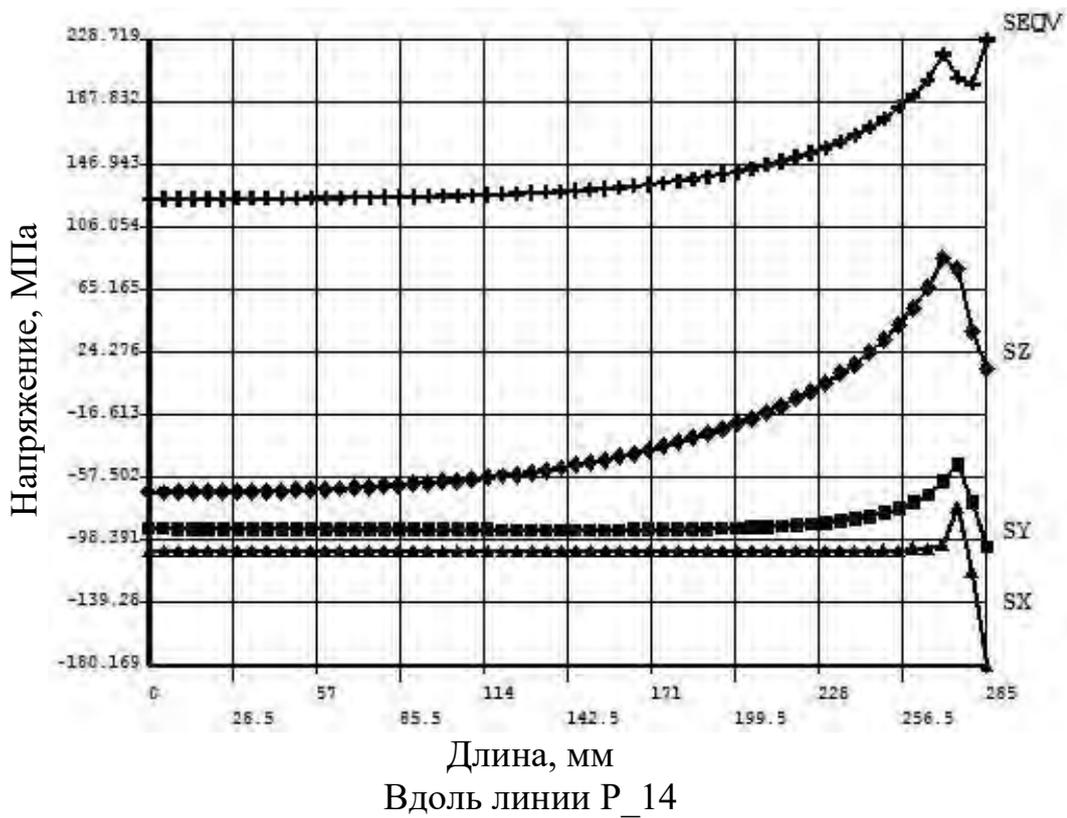
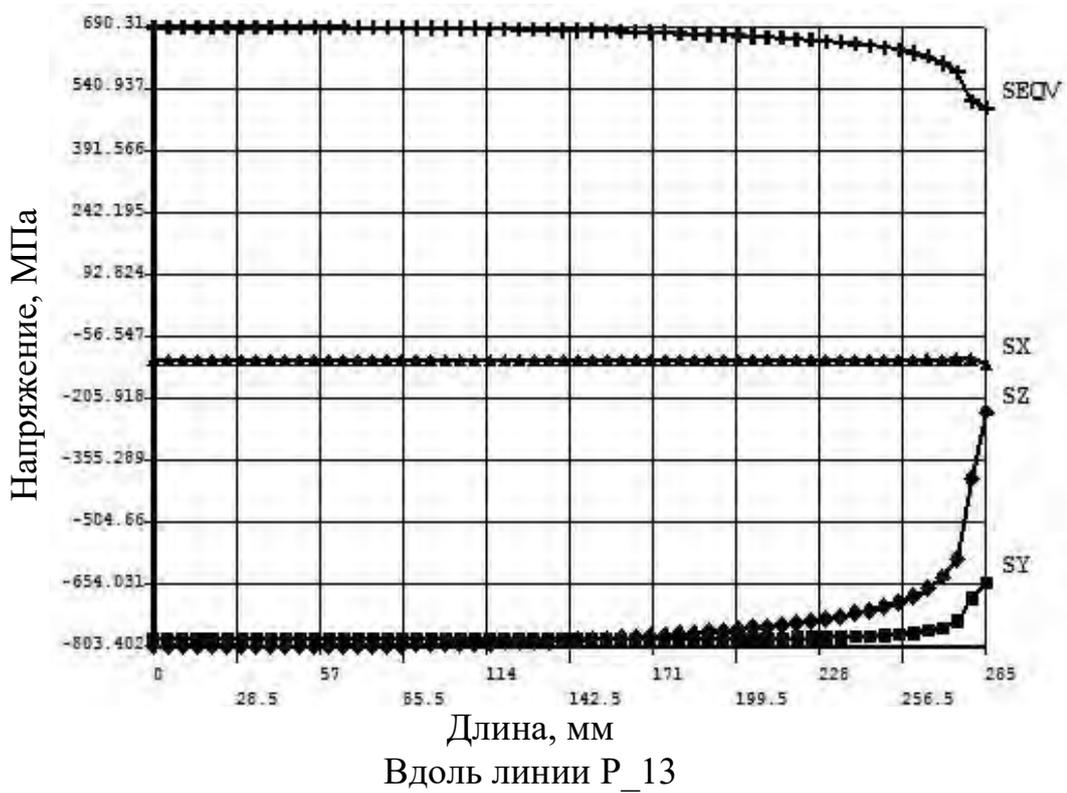


Рисунок 4.47– Характер напряжений вдоль линий P_13 и P_14 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 2 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом.

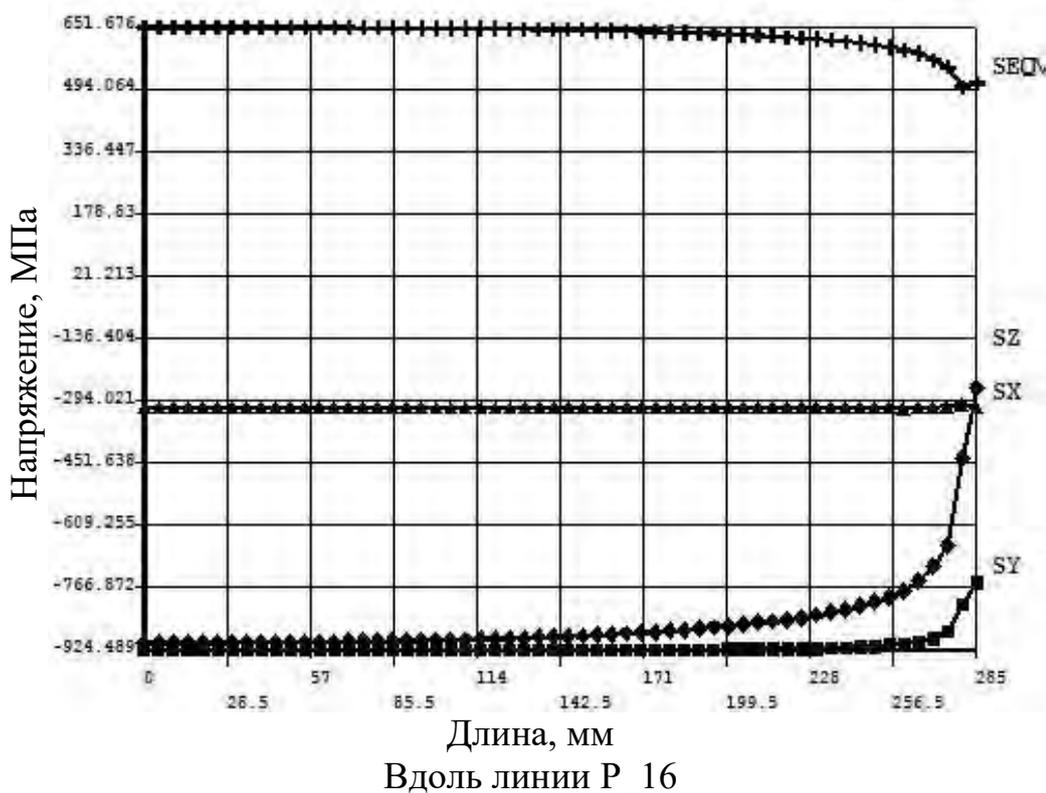
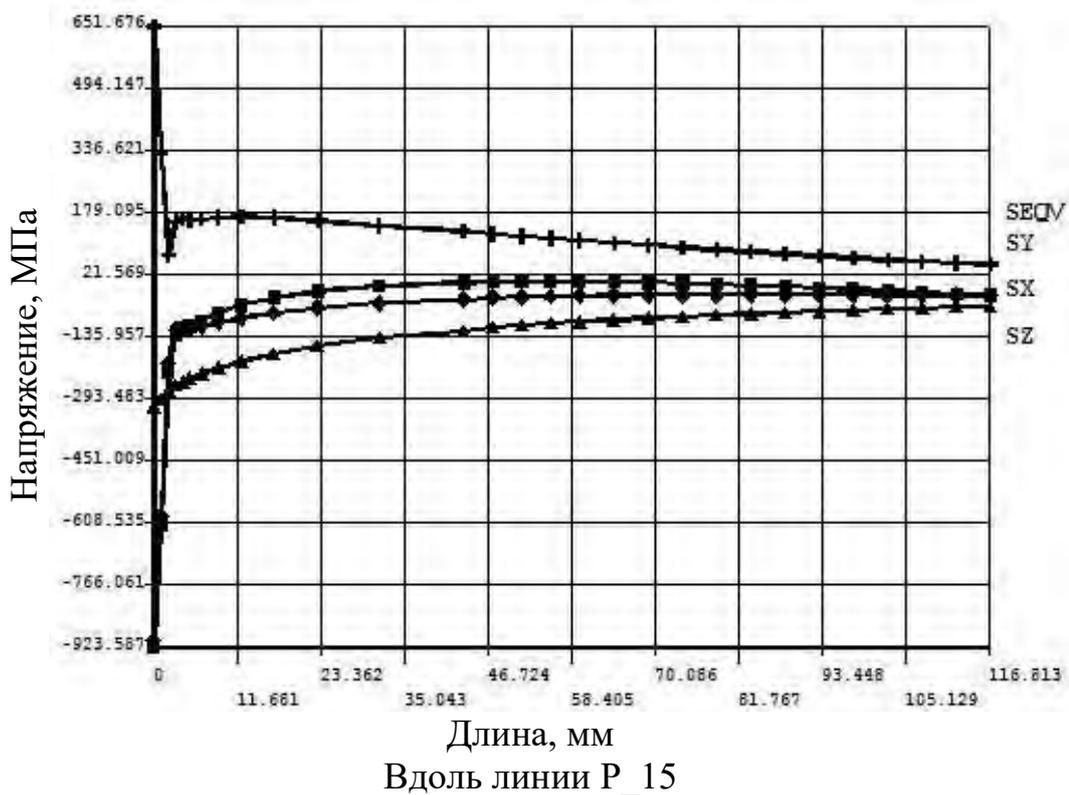


Рисунок 4.48 – Характер напряжений вдоль линий P_15 и P_16 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 2 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом

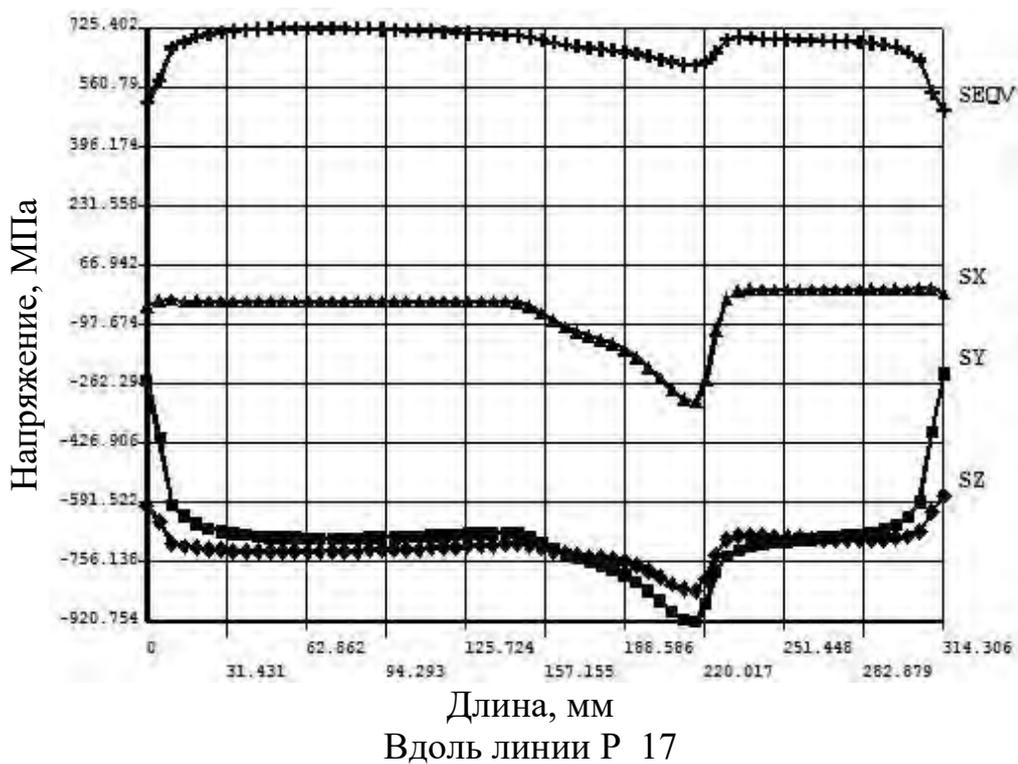


Рисунок 4.49 – Характер напряжений вдоль линий P_17 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе. Температурное поле по варианту 2 - охлаждения бойка с боковых поверхностей и суппорта – воздухом

4.9. Оценка напряжений в стенках-бойках различной конструкции установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб

Стенки-бойки установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении стальных листов для сварных труб одновременно воспринимают усилия обжатия и температурную нагрузку. В связи с этим для обоснованного выбора конструкции и материала стенок-бойков необходимо определить их напряженное состояние при различных режимах нагружения. Для сравнительной оценки напряженного состояния стенок-бойков различной конструкции рассмотрено два их конструктивного исполнения: с каналами для их охлаждения и без каналов.

На первом этапе расчета определены величины и закономерности распределения осевых напряжений от усилия обжатия в стенках-бойках с

каналами. Установлено, что каналы в стенках-бойках приводят к повышению осевых сжимающих напряжений практически в два раза и к возникновению осевых растягивающих напряжений величиной 120 – 140 МПа в области каналов стенок бойков [13,24,26]

На втором этапе расчета определены температурные поля и осевые термоупругие напряжения в стенках-бойках с каналами и без них. Установлено, что температура контактной поверхности стенок-бойков без каналов составляет 510 – 530 °С, что приводит к возникновению высоких осевых термоупругих напряжений на контактной поверхности величиной минус 831 – 910 МПа. При расчете стенок-бойков с каналами температура их контактных поверхностей снизилась до 380 – 400 °С, что привело к снижению максимальных осевых сжимающих термоупругих напряжений до минус 730 МПа (рис. 6.14, табл. 4.17). В работах [13,24,26] установлено, что каналы для охлаждения стенок-бойков не только приводят к возникновению в области каналов высоких растягивающих напряжений (до 240 МПа), но существенно повышают уровень сжимающих суммарных напряжений до значения минус 840 МПа (табл. 4.17).

График зависимости осевых сжимающих термоупругих напряжений в стенках-бойках от температуры контактной поверхности приведен на рисунке 4.50. Этот график позволяет по экспериментально замеренным температурам контактных поверхностей стенок-бойков опытно-промышленной установки оценить уровень термоупругих напряжений и более обоснованно выбирать материал стенок-бойков с целью повышения их стойкости.

Анализ напряженного состояния системы бойки - полоса при получении листов из стали для сварных труб показал, что для повышения стойкости стенок-бойков температура их контактных поверхностей не должна превышать 350 °С. В этом случае эквивалентное напряжение по Мизесу будет не более 650 МПа и в качестве материала стенок-бойков целесообразно использовать сталь 150 ХНМ, у которой при температуре 300-

400 °С предел текучести равен 640-620 МПа. Также необходимо выбрать систему охлаждения стенок-бойков во время холостых ходов, чтобы температура их контактных поверхностей не превышала 350 °С.

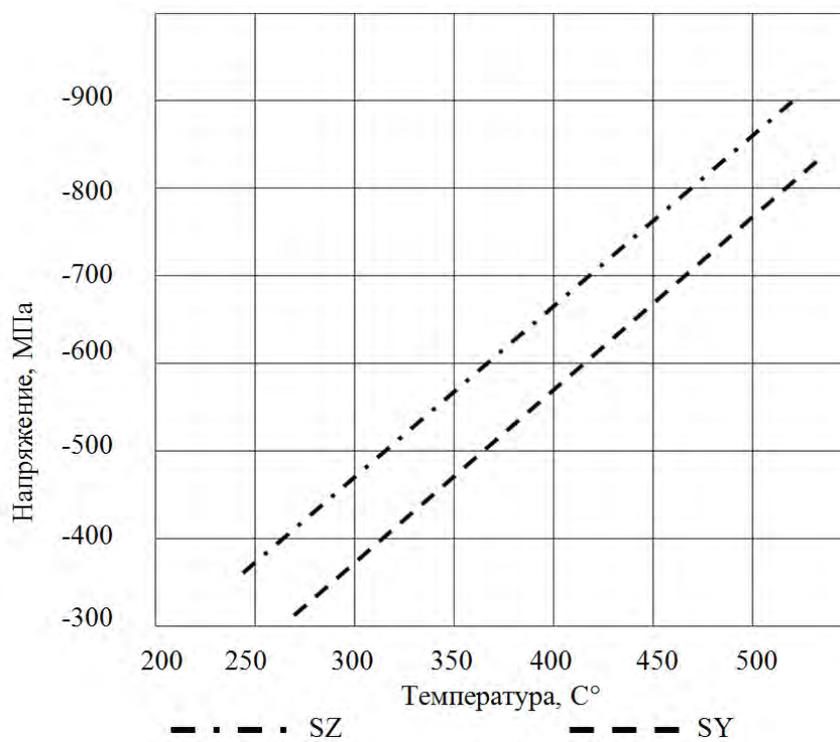


Рисунок 4.50 – Зависимость осевых сжимающих термоупругих напряжений в стенках–бойках без каналов от температуры контактной поверхности при обжатии полосы

Таким образом, сравнительный анализ напряженного состояния стенок-бойков с каналами и без них показал, что каналы являются концентраторами напряжений, поскольку они в области каналов повышают уровень осевых сжимающих напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки, а также приводят к возникновению осевых растягивающих термоупругих напряжений. С другой стороны, каналы в стенках бойках позволяют снизить на 130 °С температуры их контактной поверхности в сравнении со стенками-бойками без каналов и, соответственно, снизить максимальные термоупругие напряжения с минус 910 МПа до минус 730 МПа, а максимальные осевые суммарные напряжения с минус 1033 МПа до минус 780 МПа.

Таблица 4.17 – Напряженное состояние стенки-бойка различной конструкции при получении листов из стали для сварных труб на установке непрерывного литья и деформации

Конструкция стенки-бойка	Температура контактной поверхности стенки-бойка, °С	Напряжения от усилия обжатия, МПа						Термоупругие напряжения, МПа						Суммарные напряжения, МПа					
		SX		SY		SZ		SX		SY		SZ		SX		SY		SZ	
		кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок	кп	ок
Стенка-боек с каналами $q=20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	380-400	-200	-300	-210	120	-100	140	-50	-530 230	-600	110	-730	140	-280	-840 240	-670	180	-780	220
Стенка-боек без каналов $q=20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	510-535	-275	-	-233	-	-115	-	-50	-	-831	-	-910	-	-324	-	-967	-	-1033	-
Стенка-боек без каналов $q=10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	310-320	-275	-	-233	-	-115	-	-39	-	-410	-	-486	-	-297	-	-592	-	-615	-

4.10 Экспериментальное исследование процесса непрерывного литья и деформации на опытной установке ОАО «Уральский трубный завод».

Экспериментальное исследование параметров совмещенного процесса непрерывного литья и деформации проведено на опытной установке (рисунок 4.51), которая установлена на участке литейно-ковочного производства ОАО «Уральский трубный завод». В состав участка входит индукционная печь, промежуточный ковш и система автоматического управления.



Рисунок 4.51 – Установка непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод»

При проведении экспериментального исследования установки непрерывного литья и деформации проводили замеры значений тока якоря электродвигателя привода эксцентриковых валов, а так же температуры стенок медного кристаллизатора, полосы и стенок-бойков установки.

Измерение температуры стенки кристаллизатора проводится с помощью термопары HEL-705-T-1-12 производства компании Honeywell с пределом измерений до 260 °С с точностью измерения $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Три таких термопары встроены в стенки кристаллизатора на разных уровнях. Температура сляба измеряется с помощью пирометра Metis MQ11 с точностью измерения $\pm 4^{\circ}\text{C}$. Температуру контактной поверхности стенки-бойка установки определяли портативным инфракрасным пирометром DT-8859 с точностью измерения $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Экспериментальное исследование совмещенного процесса непрерывного процесса литья и деформации проводили при получении на опытной установке листа толщиной 18 – 20 мм из трубной стали 20. Толщина тонкого сляба перед обжатием стенками-бойками равна 30 мм. В результате установлено, что температура сляба выходящего из кристаллизатора находится в пределах 1200÷1270 °С (рисунок 4.52). Это соответствует температуре наружной поверхности тонкого сляба равной 1200 °С, принятой при расчете напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации.

Температура контактной поверхности стенок-бойков после выхода горячего сляба составила 300 °С. Эта величина соответствует температуре, полученной при расчете температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации (нижняя оценка).

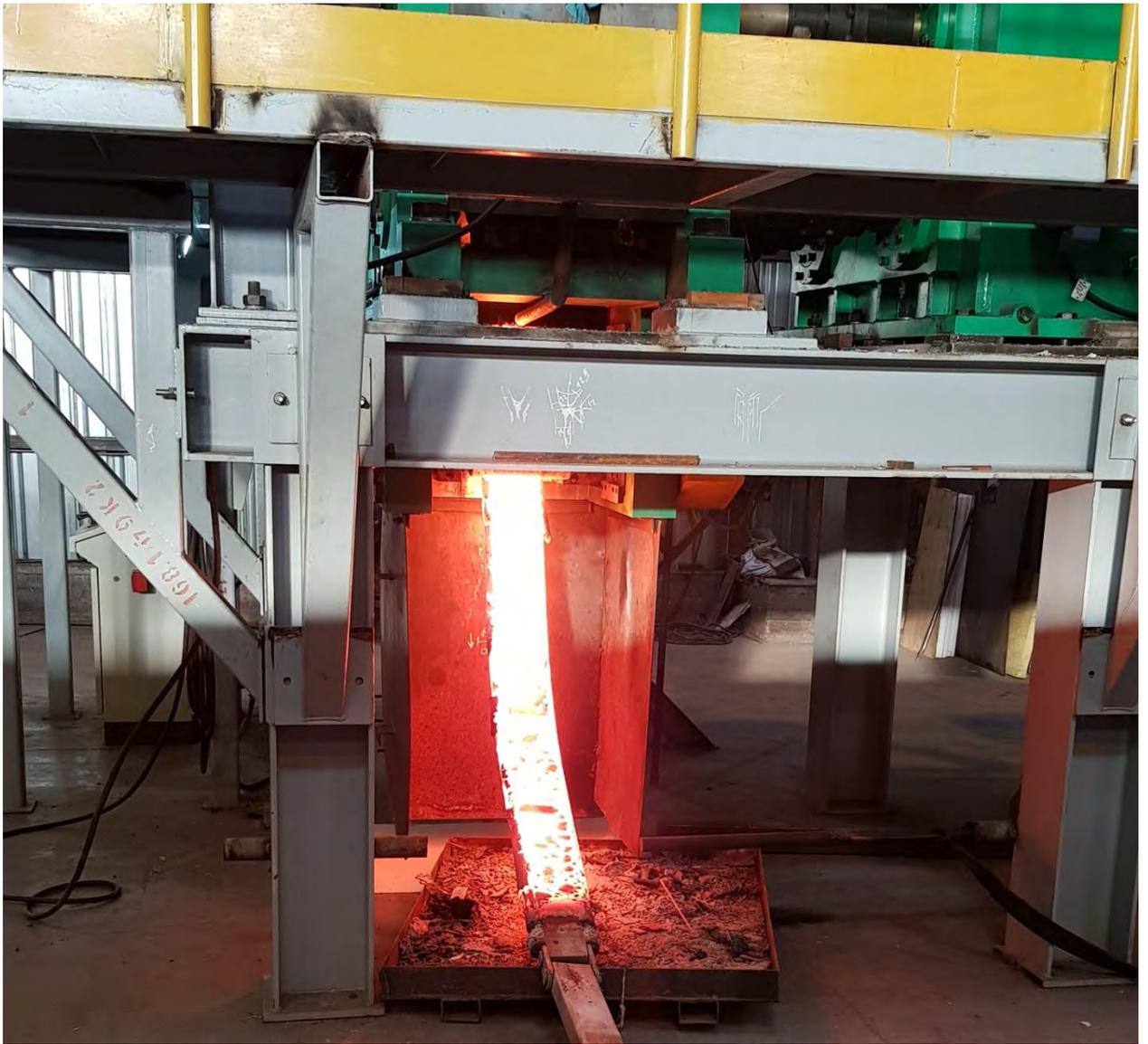


Рисунок 4.52 – Получение полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

4.11 Выводы

1. Поставлена и решена объемная задача определения температурных полей и осевых термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб.

2. Установлен характер распределения температуры в приконтактном слое и по толщине стенки-бойка без каналов в зависимости от способов его охлаждения.

3. Установлены закономерности распределения осевых и эквивалентных термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов установки при обжатию полосы и на холостом ходу. При нагреве контактной поверхности стенок-бойков без каналов до температуры 510-535 °С в них возникают максимальные осевые сжимающие термоупругие напряжения величиной до минус 910 МПа (верхняя оценка уровня напряжений), а при температуре 320 °С осевые термоупругие напряжения снижаются до минус 490 МПа (нижняя оценка уровня напряжений).

4. Разработана методика и определены закономерности распределения суммарных напряжений от усилия обжатию и температурной нагрузки при получении на установке непрерывного литья и деформации листов из стали для сварных труб. Установлено, что суммарные напряжения в стенках-бойках без каналов в направлении осей *У* и *Z* достигают максимальных значений при температуре контактной поверхности стенок-бойков, равной 520 °С, соответственно минус 980 МПа и 1033 МПа, а при температуре 320 °С - минус 596 МПа и минус 615 МПа.

5. Проведен сравнительный анализ напряженного состояния стенок-бойков различного конструктивного исполнения при получении на установке непрерывного литья и деформации листов из стали для сварных труб. Установлено, что каналы в стенках-бойках являются концентраторами напряжений, поскольку они в области каналов повышают уровень осевых сжимающих напряжений от усилия обжатию и температурной нагрузки, а также приводят к возникновению осевых растягивающих термоупругих напряжений. С другой стороны, каналы в стенках-бойках позволяют снизить на 130 °С температуру их контактной поверхности в сравнении со стенками-бойками без каналов и, соответственно, уменьшить максимальные сжимающие термоупругие напряжения с минус 910 МПа до минус 730 МПа.

6. Проведено экспериментальное исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации на опытной установке ОАО «Уральский трубный завод» которое позволило оценить результаты теоретического исследования напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации и температурных полей стенок-бойков установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теоретического исследования определено напряженное состояние системы бойки - полоса при получении листов из стали для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

- в результате решения задачи определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации определена нагруженность оборудования установки и установлены закономерности распределения осевых напряжений в очаге циклической деформации при получении листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм из стали 09Г2С;

- установлено, что в очаге циклической деформации возникают высокие сжимающие напряжения (до минус 326 МПа), что способствует хорошей проработке литой структуры тонкого сляба и улучшению качества листов из стали для сварных труб;

- поставлена и решена объемная задача определения напряженного состояния стенки-бойка без каналов от воздействия усилия обжатия при получении на установке листов из стали для сварных труб. Установлено, что в стенке-бойке без каналов возникают осевые сжимающие напряжения от усилия обжатия, достигающие значений минус 275 МПа;

- разработан алгоритм определения температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов установки при получении листов из стали для сварных труб с использованием программного комплекса ANSYS;

- поставлена и решена объемная задача определения температурных полей и осевых термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов установки при получении листов из стали для сварных труб;

- установлены закономерности распределения температурных полей и осевых термоупругих напряжений в стенках-бойках без каналов при обжатии полосы и на холостом ходу;

- установлено, что при нагреве контактной поверхности стенок – бойков без каналов при обжатии полосы до температуры 510-535 °С в них возникают максимальные осевые сжимающие термоупругие напряжения величиной минус 740 – 910 МПа (верхняя оценка). При нагреве контактной поверхности стенки-бойка без каналов до 320 °С осевые сжимающие термоупругие напряжения достигают величины, равной минус 486 МПа (нижняя оценка);

- разработана методика и определены закономерности распределения суммарных напряжений в стенках-бойках без каналов установки от усилия обжатия и температурной нагрузки при получении листов из стали для сварных труб. Установлено, что суммарные напряжения в стенках-бойках в направлении осей Y и Z достигают максимальных значений при температуре контактной поверхности стенок-бойков, равной 520°С, соответственно минус 980 МПа и 1033 МПа, а при температуре 320 °С – 595 МПа и 615 МПа;

- проведен сравнительный анализ напряженного состояния стенок-бойков различного конструктивного исполнения при получении на установке непрерывного литья и деформации листов из стали для сварных труб. Установлено, что каналы в стенках-бойках являются концентраторами напряжений, поскольку они в области каналов повышают уровень осевых сжимающих напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки, а также приводят к возникновению осевых растягивающих термоупругих напряжений. С другой стороны, каналы в стенках-бойках позволяют снизить на 130 С температуру их контактной поверхности в сравнении со стенками-бойками без каналов и, соответственно, уменьшить максимальные сжимающие термоупругие напряжения с минус 910МПа до минус 730 МПа.

- проведено экспериментальное исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации на опытной установке ОАО «Уральский

трубный завод», которое позволило оценить результаты теоретического исследования напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации и температурных полей стенок-бойков установки.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Полученные в диссертации разработки будут использованы при проектировании и изготовлении промышленной установки непрерывного литья и деформации для производства полос из стали для сварных труб толщиной 3-22 мм и шириной до 2250 мм на ОАО «Уральский трубный завод».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Эренберг Х.-Ю. Литье и обжатие с разливки тонких слябов на заводе фирмы «Маннесман ререн-верке АГ» / Х.-Ю. Эренберг // *Металлургическое производство и технология металлургических процессов*; пер.с нем. М., 1990. С. 46-56.
- 2 Еберле А. Непрерывная разливка и прокатка тонких слябов /А. Еберле, Г. Воллнер, Д. Габел и др. // *Сталь и железо*. 1990. №1. С. 81-88.
- 3 Бровман М.Я. Возможности валковых литейно-прокатных агрегатов при создании мини-заводов / М.Я. Бровман, В.П. Полухин, В.А. Николаев // *Национальная металлургия*. 2006. № 5. С.81-86.
- 4 Бровман М.Я. Анализ температурного режима и повышение эффективности охлаждения валков и роликов / М.Я. Бровман, В.А. Николаев, В.П. Полухин // *Производство проката*. 2007. № 7. С. 36-43.
- 5 Николаев В.А. Некоторые особенности процесса бесслитковой прокатки стальных полос / В.А. Николаев // *Производство проката*. 2007. № 5. С.11-13.
- 6 Бровман М.Я. Технологические основы и критерии выбора диаметра валков–кристаллизаторов при бесслитковой прокатке / М.Я. Бровман, В.А. Николаев / *Производство проката*. 2007. № 11. С. 2-6.
- 7 Бровман М.Я. Сопротивление пластической деформации стали в процессе валковой бесслитковой прокатки / М.Я. Бровман, В.А. Николаев, В.П. Полухин // *Металлы*. 2007. № 4. С. 33-40.
- 8 Бровман М.Я. О повышении качества поверхности при прокатке в валковых совмещенных агрегатах / М.Я. Бровман, В.А. Николаев / *Производство проката*. 2006. № 5. С. 9-14.
- 9 Бровман М.Я. Протяженность зоны пластической деформации и допустимая скорость бесслитковой прокатки / М.Я. Бровман, В.А. Николаев, В.П. Полухин // *Металлы*. 2007. №1. С. 44-49.

10 Лехов О.С. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Теория и расчет / О.С. Лехов, В.В. Турлаев, И.В. Лисин. - Екатеринбург: Изд. УРФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. 112 с.

11 Лехов О.С. Способ непрерывного литья слябовых заготовок и устройство для его осуществления / О.С. Лехов. //Патент 2077407, Россия.

12 Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного металла в очаге циклической деформации при получении листа из стали на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, М.В. Баранов, В.С. Минаков // Известия вузов. Черная металлургия. 2004. № 2. С. 25-27.

13 Лехов О.С. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет / О.С. Лехов, А.В. Михалев. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. – 151 с.

14 Лехов О.С. Установка непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб / О.С. Лехов, М.Ю. Туев, Д.Х. Билалов, М.М. Шевелев // Производство проката. 2017. № 7. С. 13-15

15 Лехов О.С. Литье и обжатие тонких слябов при получении листов из стали для сварных труб на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, А.В. Михалев, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2017. № 3. С. 32-36

16 Лехов О.С. Моделирование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб / О.С. Лехов, А.В. Михалев., М.М. Шевелев, М.Ю. Туев, Д.Х. Билалов // КШП ОМД. 2017. № 8. С. 31 - 34.

17 Lekhov O.S. Cyclic-deformation system for the reduction of continuous-cast slabs / O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev, D.Kh. Bilalov, M.M. Shevelev // Steel in translation. 2017. Vol. 47. № 4. pp 225-228

18 Лехов О.С. Установка циклической деформации для обжата непрерывнолитых слябов / О.С. Лехов, А.В. Михалев, Д.Х. Билалов, М.М. Шевелев // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2017. Том 60. № 4. С. 257-261

19 Лехов О.С. Исследование установки непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Сообщение 1 / О.С. Лехов, А.В. Михалев // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2017. № 6. С. 430 - 435.

20 Лехов О.С. Исследование установки непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Сообщение 2 / О.С. Лехов, А.В. Михалев // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2017. № 7. С. 522 - 526.

21 Лехов О.С. Автоматизированный расчет параметров установки непрерывного литья и деформации для производства листов из черных и цветных металлов и сплавов/ О.С. Лехов, А.В. Михалев, Д.Х. Билалов, И.В. Лисин, М.М. Шевелев // X Международная научно-техническая конференция "Проблемы исследования и проектирования машин". - Пенза: Приволжский Дом знаний. 2016. - 108 с.

22 Лехов О.С. Моделирование совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации при получении листов из стали для сварных труб / О.С. Лехов, А.В. Михалев, М.М. Шевелев, Билалов Д.Х. // Доклады XXI Международной научно-технической конференции. Тула. 2017. С. 69-73.

23 Лехов О.С. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для производства сварных труб / О.С. Лехов, М.Ю. Туев, А.В. Михалев, Д.Х. Билалов, М.М. Шевелев // Материалы XI Международного Конгресса Прокатчиков. г. Магнитогорск. 2017. С. 50-55.

24 Лехов О.С. Напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для

сварных труб / О.С. Лехов, А.В. Михалев, Д.Х. Билалов, М.М. Шевелев // Материалы XI Международного Конгресса Прокатчиков. г. Магнитогорск. 2017. С. 95-100.

25 Лехов О.С. Оценка качества листов из стали для сварных труб и энергоемкости совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, А.В. Михалев, М.М. Шевелев // Инновации в образовании, науке и промышленности: сборник научных статей по материалам 1 Международной научно-практической конференции. Пермь: ИП Сагитов Т.М., 2016. С. 20-22.

26 Лехов О.С. Напряженное состояние системы бойки-полоса при получении листов из стали для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, А.В. Михалев, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Материалы X Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов "Будущее машиностроения России" МГТУ им. Баумана. Москва. 2017. С. 85-88.

27 Лехов О.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката / О.С. Лехов, Ю.С. Комратов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 411с.

28 Лехов О.С. Исследование совмещенного процесса непрерывной разливки и циклической деформации для получения листов из стали / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, И.В. Лисин, Д.Х. Билалов // Сталь. 2016. №1. С 52-62.

29 Лехов О.С. Установка совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства тонких слябов и листа / О.С. Лехов, В.И. Одинокоев // Черная металлургия России и СНГ в XXI веке: Сб. тр. Межд. Конф. Т.3. М.: Металлургия. 1994. С. 189-191.

30 Лехов О.С. Оптимизация машин для деформации непрерывнолитых заготовок / О.С. Лехов. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1995. 184 с.

31 Богатов А.А. Конечно-элементное моделирование процесса толстолистовой прокатки / А.А. Богатов, Д.Ш. Нухов, К.П. Пьянков // *Металлург*. 2015. № 2. С.14-15.

32 Эффрон Л.И. *Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали* / Л.И. Эфрон. – М.: *Металлургиздат*, 2012. – 696 с.

33 Салганик В.М. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния раската в черновых проходах применительно к стану 5000 ОАО «ММК» / В.М. Салганик, Д.О. Шмаков, С.А. Пустовойтов // *Производство проката*. 2009. № 11. С. 10-14.

34 Колбасников Н.Г. Корректировка методик расчета энергосиловых параметров прокатки толстого листа на стане 5000 ОАО «Северсталь» / Н.Г. Колбасников, И.А. Шилов, А.А. Беляев // *Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии» Ч.1* – М.: *Белый ветер*, 2014. С. 213-214.

35 Столяров А.М. Эффективность мягкого обжатия непрерывнолитых слябов различной толщины / А.М. Столяров, В.В. Мошкунов // *Черная металлургия*. 2016. Выпуск 12. С. 53-56.

36 Рашников В.Ф. Освоение и совершенствование технологии прокатки листов на стане 5000 ОАО «ММК» / В.Ф. Рашников [и др.] // *Труды восьмого конгресса прокатчиков*. Т. 1. Магнитогорск. 2010. С. 4-16.

37 Салганик В.М. Особенности формирования и совершенствования режимов прокатки непрерывнолитых слябов, имеющих дефекты / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов и др. // *Труды седьмого конгресса прокатчиков*. Т. 1. 2007. С. 5-9.

38 Настич С.Ю. Влияние параметров контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения на формирование структуры и свойств толстолистового проката класса прочности К60 / С.Ю. Настич [и др.] // *Труды восьмого конгресса прокатчиков*. Т.1. Магнитогорск. 2010. С. 73-80.

39 Салганик В.М. Моделирование процесса контролируемой прокатки трубной заготовки в условиях стана 5000 ОАО «ММК» / В.М. Салганик, Д.О. Шмаков, С.А. Пустовойтов // Труды восьмого конгресса прокатчиков. Т 1. 2010. С. 59-67.

40 Бернштейн М.Л. Структура деформируемых металлов / М.Л. Бернштейн. М.: Metallurgy, 1977. 431 с.

41 Ванюшин Д.И. Влияние спрейерного охлаждения на механические свойства листового проката класса прочности К60 в условиях ТЛС 5000 / Д.И. Ванюшин, В.В. Шаронов, А.В. Зиновьев // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии» Ч.1 – М.: Белый ветер, 2014. С. 168.

42 Морозов Ю.Д. Разработка высокоэффективных технологий производства толстолистового проката для перспективных проектов магистральных трубопроводов / Ю.Д. Морозов, М.Ю. Матросов, О.Н. Чевская // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии» Ч.1 – М.: Белый ветер, 2014. С. 263-269.

43 ANSYS / Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. <http://www.cadferm.ru>.

44 Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред / Дж. Оден. М.: Мир, 1976. 486 с.

45 Комратов Ю. С. Совершенствование производства проката в условиях НТМК / Ю. С. Комратов, О. С. Лехов. Екатеринбург: Изд-во «Банк культурной информации», 2002. 384 с.

46 Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. - М.: Мир, 1979. 393 с.

47 Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. Фризио - М.: Мир, 1981. 304 с

48 Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер М.: Мир, 1984. 432 с.

- 49 Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. - М.: Мир, 1975. 541 с.
- 50 Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки-полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 1. / О.С. Лехов // Известия вузов. Черная металлургия. 2014. №10. С. 37-41.
- 51 Комратов Ю.С. Литейно-прокатный комплекс для производства широкополочных балок / Ю.С. Комратов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. - 160с.
- 52 Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела М.: Наука, 1979. - 744 с.
- 53 Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки-полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 2. / О.С.Лехов // Известия вузов. Черная металлургия. №12. 2014. С. 15-19.
- 54 Поляков А.П. Комплекс программ решения на ЭВМ термоупругопластических задач / А.П. Поляков, А.Ф. Трусов, И.Ф. Волегов, И.В. Поваляева // Автоматизация инженерного труда: сб. научн. трудов. НИИТЯЖМАШ. Свердловск. 1989. С.105-109.
- 55 Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган – М.: Мир, 1986. – 318 с.
- 56 Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высш. Шк., 1967.- 600с. 56
- 57 Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. / А.В. Лыков.// М.: Энергия, 1978. 480 с.
- 58 Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг. М.: Атомиздат, 1978. 216 с.
- 59 Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. - М.: Мир, 1976. – 349с.

60 Марочник сталей и сплавов /В.Г. Сорокин, А.В. Волоснякова, С.А. Вяткин и др.; под общей ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640с.

61 Технологические процессы в машиностроении (Ч. II): обработка металлов давлением и сварочное производство: Учеб. для машиностроительных направлений и специальностей технических университетов / В.С. Кушнер, А.С. Верещака, А.Г. Схиртладзе, Д.А. Негров; под. ред. В.С. Кушнера. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. - 200 с.: ил.

62 Непершин Р.И. Исследование температурных полей роликов машин непрерывного литья стали / Р.И. Непершин, В.В. Клименов, В.М. Шусторович, В.А. Буторов // Машиноведение. 1974. №4. С. 81-88.

63 Денисов Ю.В. Уточнение метода определения температурных полей внутри прокатных валков / Ю.В. Денисов, М.П. Шаравин, Н.Х. Понетаева // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 1978. №12. С. 55-59.

64 Буланов Л.В. Долговечность роликов МНЛЗ при наружном и внутреннем охлаждении / Л.В. Буланов, С.Е. Карлинский, В.Е. Волегова // Надежность крупных машин: Сб. науч. Трудов НИИтяжмаш. Свердловск. 1990. С. 126-132.

65 Хлопонин В.Н. Влияние системы охлаждения на тепловые условия работы поверхностного слоя вала / В.Н. Хлопонин, М.В. Косырева, А.С. Косяк // Труды МИСиС. 1977. № 100. С. 90-93.

66 Астахов И.Г. Определение коэффициента теплоотдачи прокатных валков при охлаждении водой / И.Г. Астахов, В.К. Белосевич, С.М. Ионов, Л.С. Лебедев // Труды МиСиС. 1977. №102. С. 4-9.

67 Гарбер Э.А. Новый метод расчета конвективного теплообмена валков листовых станов / Э.А. Гарбер, А.А. Гончарский, М.П. Шаравин, В.Г. Надутов // Производство толстолистовой стали. 1981. №5. С.54-57.

68 Астахов А. А., Мазур И.П. Разработка модели для исследования теплового состояния рабочих валков станов горячей прокатки / АА. Астахов,

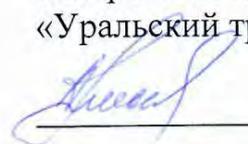
И.П. Мазур // Вестник Воронежского государственного технического университета. № 112. том 7. 2011. С. 83-86.

69 Биргера А.И. Термопрочность деталей машин / А.И. Биргер, Б.Ф. Шорр. - М.: Машиностроение, 1975. - 455 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения научно-исследовательской работы

УТВЕРЖДАЮ:
Генеральный директор ОАО
«Уральский трубный завод»


Г.А. Архипов

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы

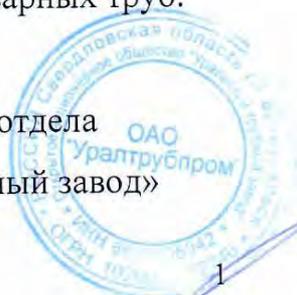
На ОАО «Уральский трубный завод» в период создания и освоения опытной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения стальных полос, исполнителем работ Шевелевым М.М. выполнена научно-исследовательская работа, в результате которой:

- определено напряженное состояние стенок-бойков различной конструкции установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации от усилия обжатия сляба и температурной нагрузки и даны рекомендации по выбору рациональной конструкции стенок-бойков и системы их охлаждения;

- проведено экспериментальное исследование параметров совмещенного процесса непрерывного литья и деформации на опытной установке, что позволило оценить результаты теоретических исследований по определению температурных параметров совмещенного процесса, нагруженности привода и оборудования установки;

- результаты работы будут использованы при создании промышленной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов толщиной 3-22 мм и шириной до 2250 мм из стали для сварных труб.

Начальник проектного отдела
ОАО «Уральский трубный завод»



В.В. Батанов