

РАСЧЕТ И ИСПЫТАНИЯ ОРТОТРОПНОЙ ПЛИТЫ БОЛЬШОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ

А. А. ЯКОВЛЕВ

Белорусский национальный технический университет

Введение.

Трехслойные плитные конструкции впервые были использованы в судостроении. Английский инженер Р. Стефенсон применил их в пролетном строении моста «Британия» [1]. Впоследствии трехслойные облегченные конструкции широко использовались в разнообразных строительных, транспортных, авиационных, космических и других объектах [116]. Конструкции находят применение и в виде плит, опирающихся на упругое основание и нагруженных большими распределенными и сосредоточенными силами. Для таких инженерных систем плиты должны иметь небольшую толщину при больших нагрузках и разнообразных опираниях.

Надежность и работоспособность новых конструктивных решений несущих систем в условиях эксплуатации зависят от ряда факторов, определяющих параметры их работы. К таким факторам относят [2; 3] климатические условия (температура, влажность окружающего воздуха, скорость ветра), мощность предприятия, расстояние транспортирования, рельеф и состояние дорог, тип машины, характеристики груза, техническое обслуживание и ремонт, культура эксплуатации (мониторинг скоростных режимов, грузоподъемности, системный контроль структурных и диагностических параметров узлов и конструкций, тип и возраст машины и др.). Учесть все указанные факторы при конечно-элементном анализе расчетной модели конструкции, объекта достаточно сложно. Поэтому расчетную модель наделяют основными, наиболее существенными признаками проектируемого физического изделия. Результаты численного анализа моделей конструктивных элементов, представленные выше и содержащие различные концентраторы, необходимо сверить с данными экспериментального исследования физических изделий (стальных образцов, конструкций).

Цель настоящей статьи – разработка конструкции, выявление элементов с возможными технологическими дефектами, экспериментальное испытание конструктивных элементов с основными дефектами и ортотропной плиты при статическом и переменном нагружении.

Конструктивно-технологические особенности плиты.

Схема такой плиты показана на рис. 1. Трехслойная плита представляет собой систему, состоящую из двух внешних листов и среднего слоя. Внешние слои также как в балках в основном воспринимают изгибающие, а средний слой – поперечные усилия. Средний слой разрабатываемой плиты выполним в форме конструкции, соединенной сварными швами с внешними покрывочными листами и состоящей из периодических замкнутых ячеек (рис. 2). Средний слой наряду с восприятием усилий обеспечивает устойчивость внешних листов в зонах их сжатия.

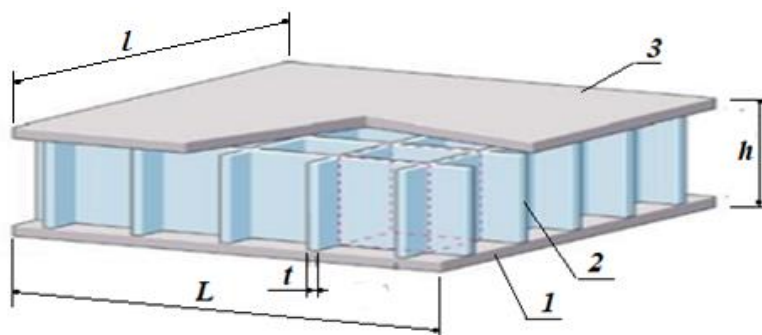


Рисунок 1 – Схема стальной трехслойной ортотропной плиты с прямоугольными ячейками в среднем слое:

1 – нижний слой; 2 – средний слой; 3 – верхний слой (покрывочный)

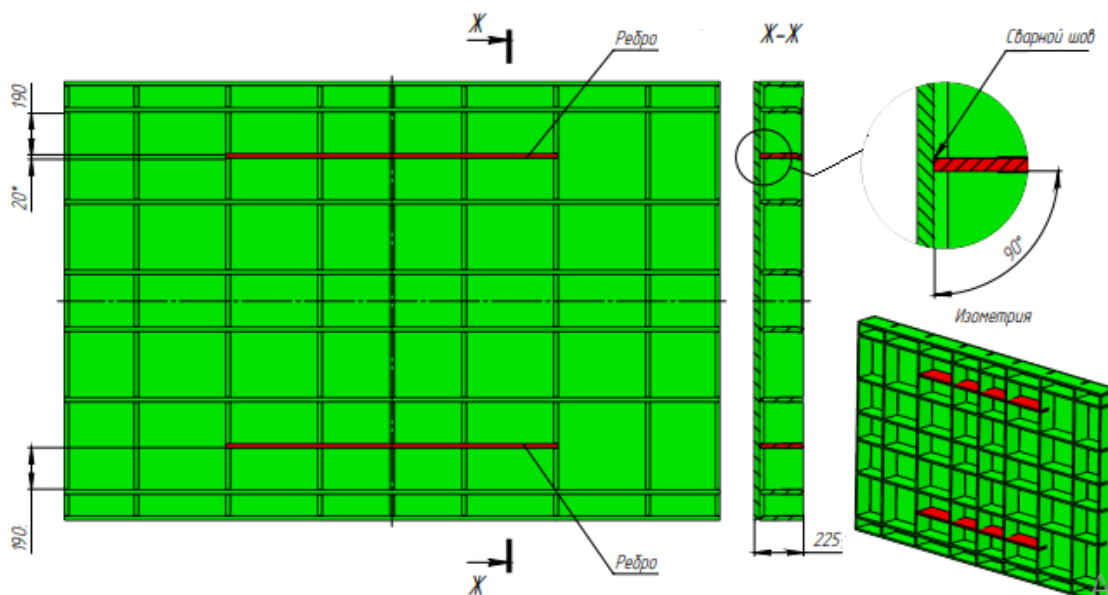


Рисунок 2 – Конструктивные особенности и геометрические размеры ячеек разрабатываемой плиты (нижний покрывочный лист не показан)

В качестве физического прототипа моделируемой плиты рассмотрим ортотропную плиту из стали марки 09Г2С размерами в плане 3000х2000 миллиметров с соединениями на сварке. Механические характеристики стали приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные механические характеристики стали

Марка стали	Механические свойства				
	Модуль Юнга, МПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
Лист, 09Г2С	214000	305	460	0,3	7850

Толщина плиты 250 мм, толщина верхнего и нижнего слоев – 20 мм. Средний слой набран из листовых элементов толщиной 18 и 20 мм. Опирания плиты шарнирные, в углублениях со стороны нижней плиты (рис. 3). Распределенная внешняя нагрузка к такой плите прикладывается в средней части верхней плиты (рис. 4).

При изготовлении 3-хслойной плиты соединение элементов выполнено полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа с формированием прорезных швов полного заполнения [4] и обварки угловыми швами по периметру покрывочных листов. При этом оси прорезных швов совмещались с осями продольных или поперечных ребер среднего слоя, а прорезы под швы выполнялись не больше толщины ребер. При сварке в зонах швов вероятно появление сварочных дефектов, непроваров, которые могут инициировать зарождение трещин в натуральных плитах при низких температурах, переменных нагрузках. Это требует выявления трещиноопасных зон в плите с использованием методов диагностики, неразрушающего контроля и экспериментального исследования прочности конструктивных форм, содержащих конструктивные и сварочные концентраторы напряжений [5].

Прочность и жесткость трехслойной плиты, напряженно-деформированное состояние ее элементов можно исследовать расчетным анализом ее модели с использованием программы ANSYS.

Конечно-элементная (КЭ) модель такой плиты представлена на рис. 5. Модель выполнена с использованием КЭ Solid-186, Shell-181. Размер ячейки КЭ 10 мм.

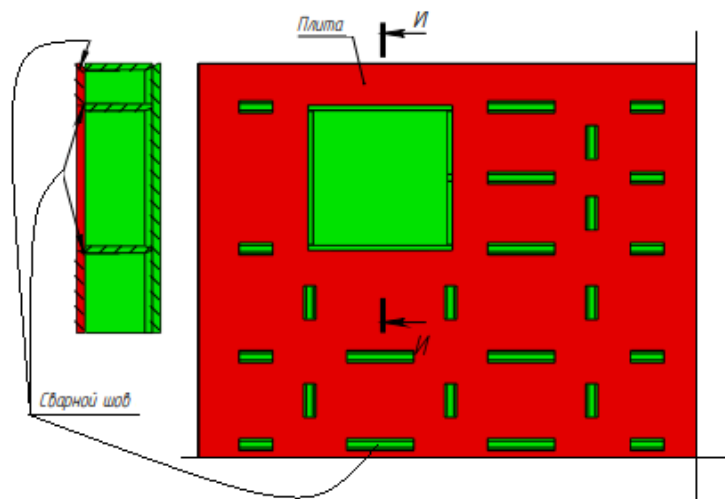


Рисунок 3 – Расположение сварных швов и опорной зоны (вид на $\frac{1}{4}$ нижней покрывочной плиты)

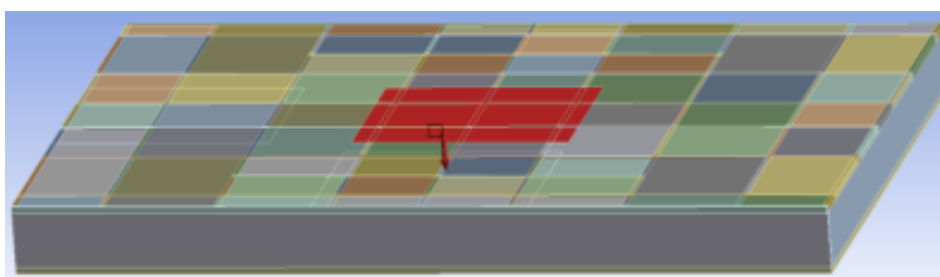


Рисунок 4 – Зона приложения распределенной внешней нагрузки (красный цвет), равнодействующая которой равна 1000 кН

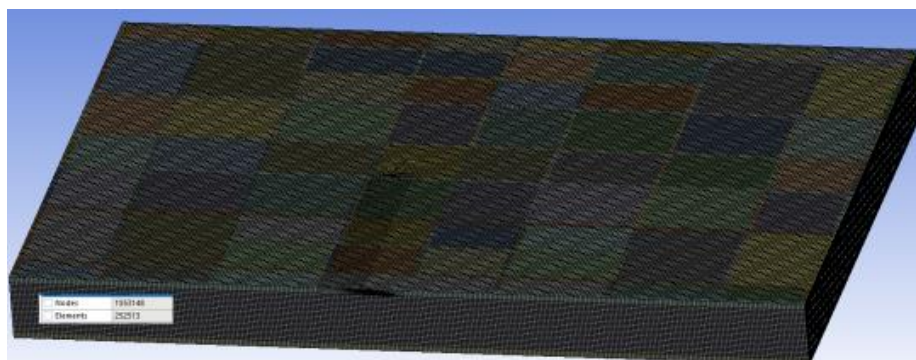


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель плиты

Полученные расчетом поля перемещений и эквивалентных напряжений приведены на рис. 6 и в табл. 2. Максимальное расчетное перемещение в центре плиты составляет 8,6 мм.

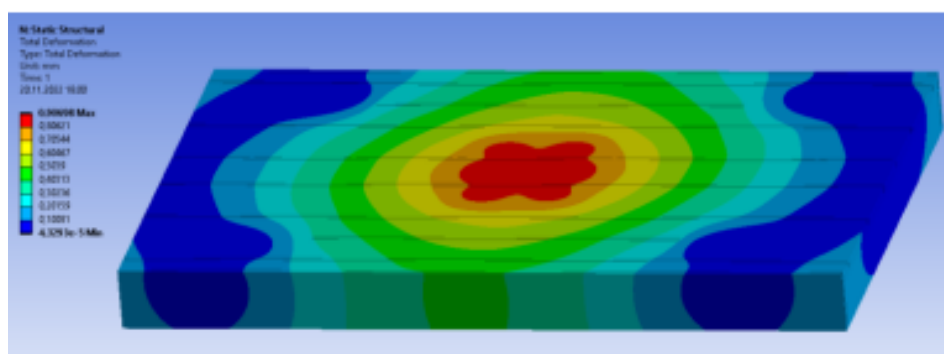
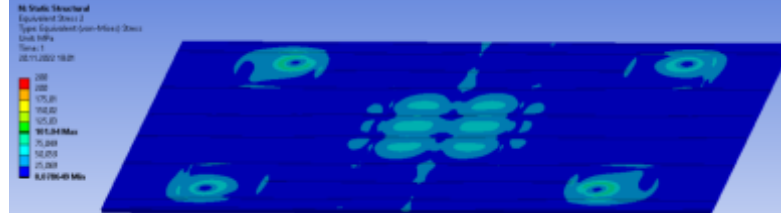
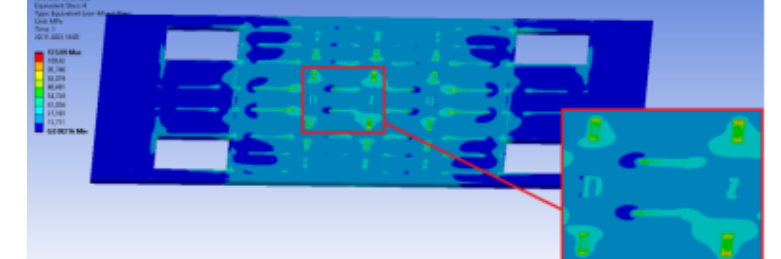
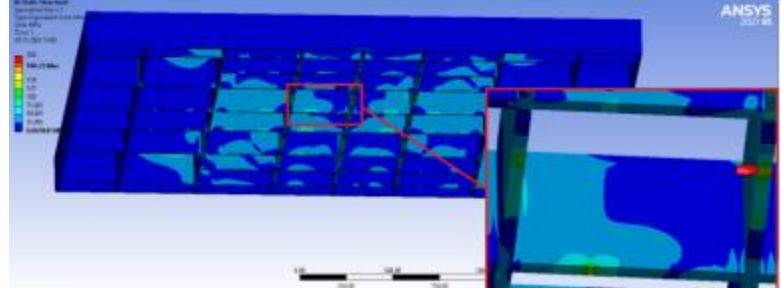



Рисунок 6 – Поле вертикальных перемещений точек плиты при максимальной нагрузке

Таблица 2 – Поля напряжений в элементах плиты при максимальной нагрузке

Характеристика напряженного состояния	Поле напряжений в элементе плиты	Максимальное значение, МПа
$\sigma_{\text{экв}}$ (верхний лист)		101
$\sigma_{\text{экв}}$ (нижний лист)		123
$\sigma_{\text{экв}}$ (средний слой)		191
σ (в швах)		97

Конструктивно-технологические дефекты в плите и испытания образцов. Причины появления технологических дефектов – электродуговая сварка в стесненных условиях, отклонения от требований проектной документации. В эксперименте изучим поведение образцов (рис. 7). Вид образцов после испытаний показан на рис. 8.

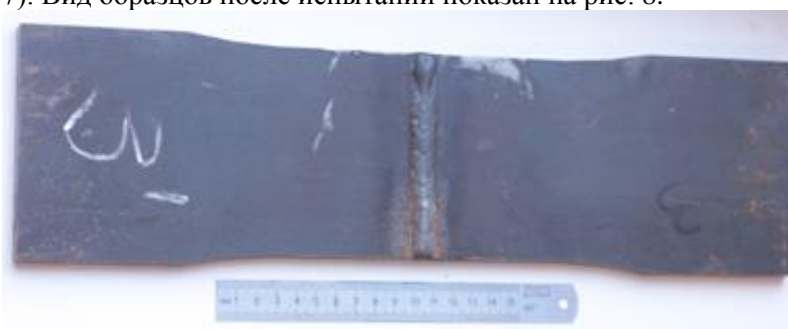


Рисунок 7 – Общий вид образца до испытаний



Рисунок 8 – Общий вид образца после испытаний

Процесс испытаний фиксировался с помощью инфракрасного компьютерного термографа «ИРТИС-2000 АН». Кадры термофильма представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Кадры термофильма № 1

<p>Кадр 190: $T_b = 15,12 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 18,88 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 14,92 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с}$.</p>		
<p>Кадр 236: $T_b = 15,12 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 27,18 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 14,86 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 150,00 \text{ с}$.</p>		

<p>Кадр 237: $T_B = 15,12 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 69,31 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 15,07 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с.}$</p>	
<p>Кадр 237: $T_B = 15,12 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 69,31 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 15,07 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с.}$ (объемная модель)</p>	
<p>Кадр 238: $T_B = 15,21 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 39,14 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 17,91 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с.}$</p>	
<p>Кадр 241: $T_B = 15,22 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 28,05 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 17,54 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с.}$</p>	

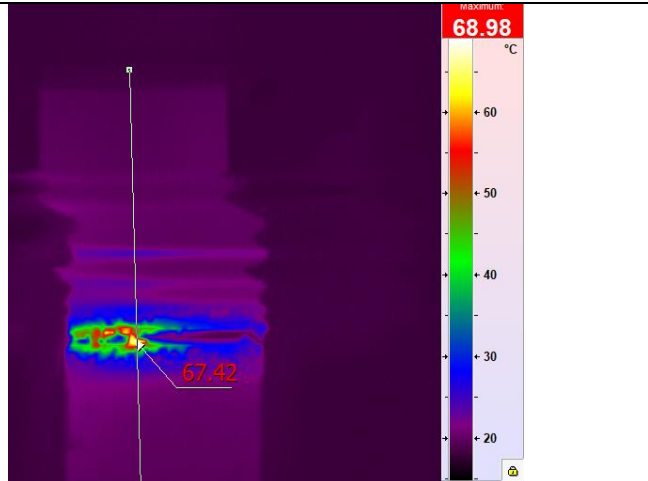
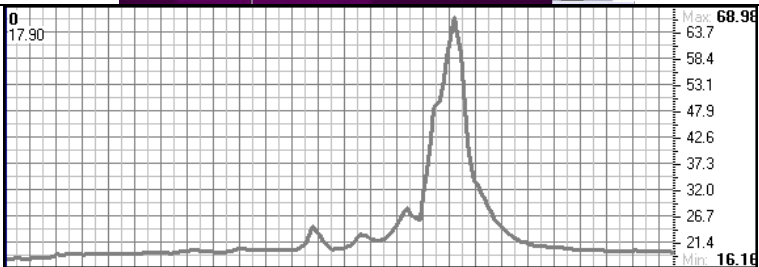
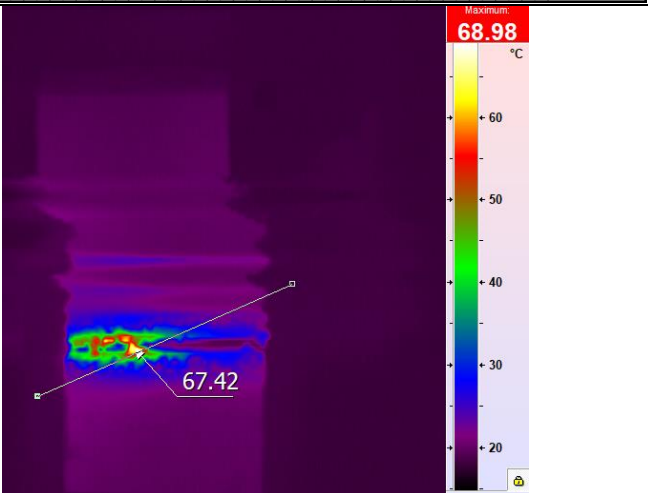
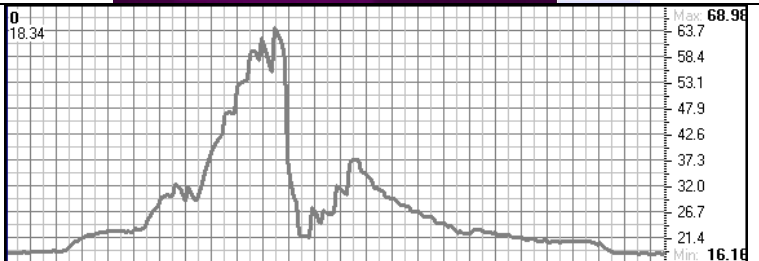
<p>Указание направления и точки измерения, образец 3, кадр 237</p>	
<p>Температурное поле поверхности для кадра № 237 образец 3 (момент разрушения)</p>	
<p>Указание направления и точки измерения, образец 3, кадр 237</p>	
<p>Температурное поле поверхности для кадра № 237 образец 3 (момент разрушения)</p>	

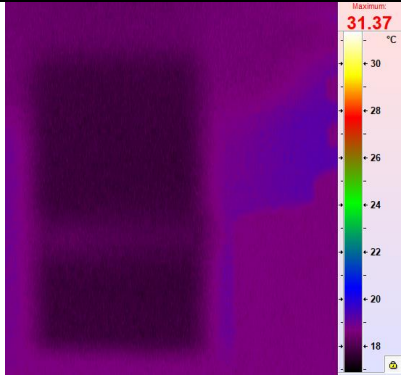
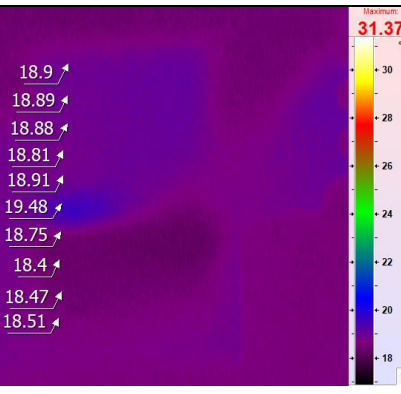


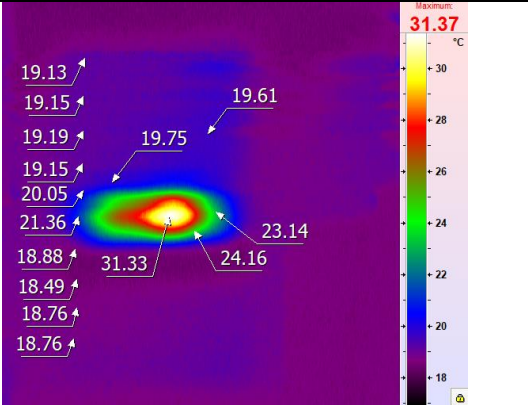
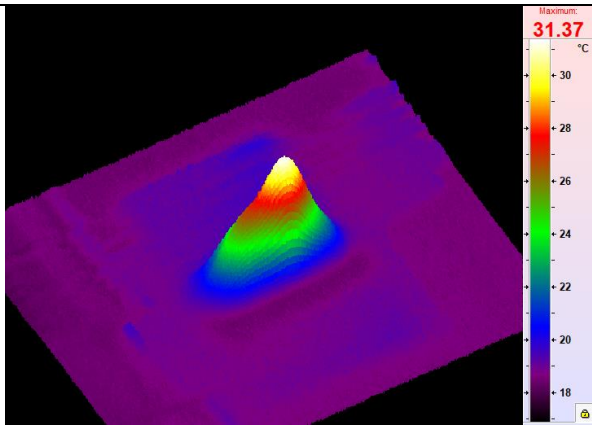
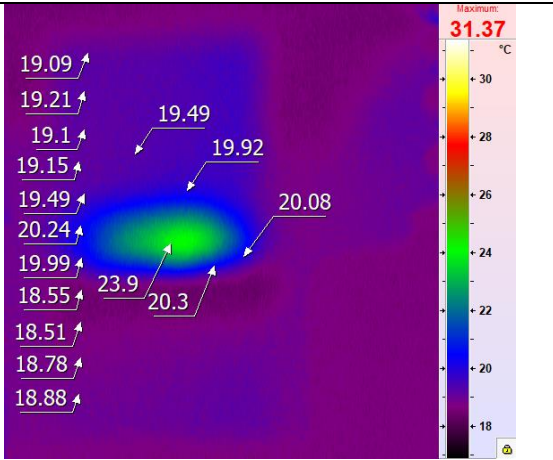
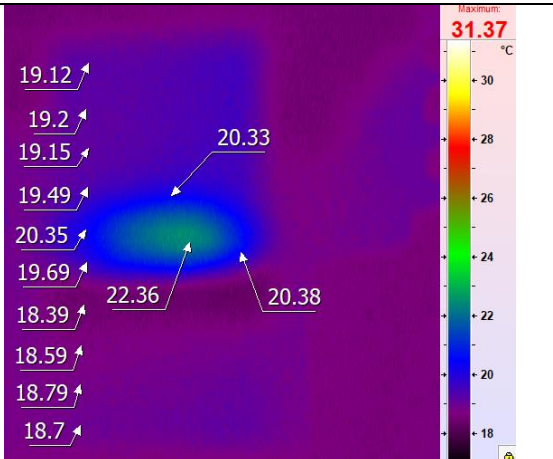
Рисунок 9 – Общий вид образца до испытаний

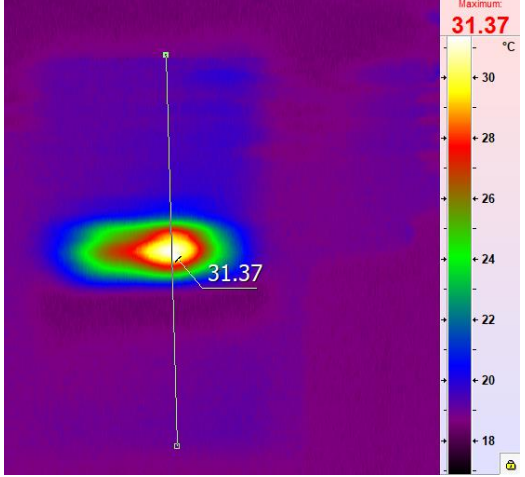
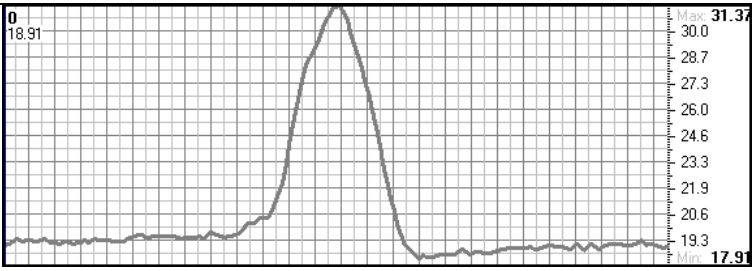
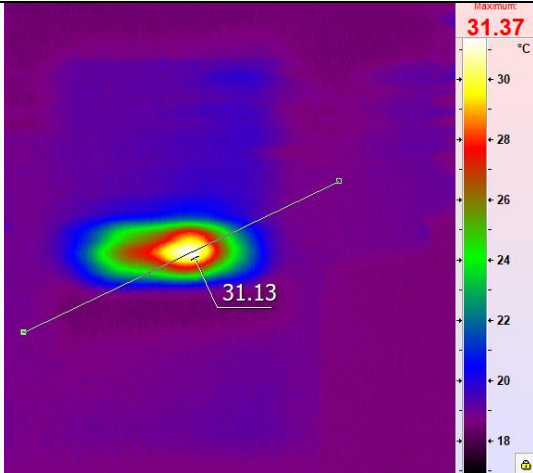
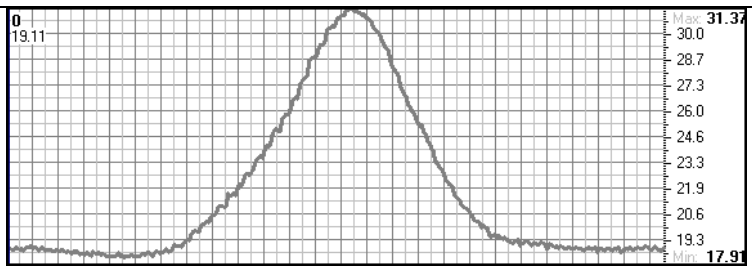


Рисунок 10 – Общий вид образца после испытаний

Таблица 3 – Кадры термофильма № 2

<p>Кадр 50: $T_B = 18,64 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 17,94 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 17,62 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с.}$</p>	
<p>Кадр 160: $T_B = 18,66 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 19,81 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 18,58 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 150,00 \text{ с.}$</p>	 <p>18.9 ↗ 18.89 ↗ 18.88 ↗ 18.81 ↗ 18.91 ↗ 19.48 ↗ 18.75 ↗ 18.4 ↗ 18.47 ↗ 18.51 ↗</p>

<p>Кадр 161: $T_B = 18,73 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 31,58 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 18,67 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с.}$</p>	
<p>Кадр 161: $T_B = 18,73 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 31,58 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 18,67 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с.}$ (объемная модель)</p>	
<p>Кадр 162: $T_B = 18,89 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 24,21 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 18,82 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с.}$</p>	
<p>Кадр 163: $T_B = 18,85 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 23,45 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 18,61 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с.}$</p>	

<p>Указание направления и точки измерения, образец 12, кадр 237</p>	
<p>Температурное поле поверхности для кадра № 237 образец 3 (момент разрушения)</p>	
<p>Указание направления и точки измерения, образец 12, кадр 237</p>	
<p>Температурное поле поверхности для кадра № 237 образец 3 (момент разрушения)</p>	

Аномалии температурных полей элементов поверхности ортотропной плиты.

Виды плиты показаны на рис. 11. Температурное поле поверхности показано на рис. 15, 16. Максимальные перемещения плиты изображены на графике рис. 17. В процессе нагружения плита работала в упругой стадии.

Изменение поля температур поверхности торца плиты с $9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $10,89\text{ }^{\circ}\text{C}$ зафиксировано на рис. 15, 17. Заметна разница деформационных температур сжатого (верхнего) и растянутого (нижнего) листов плиты.



Рисунок 11 – Общий вид образца до испытаний

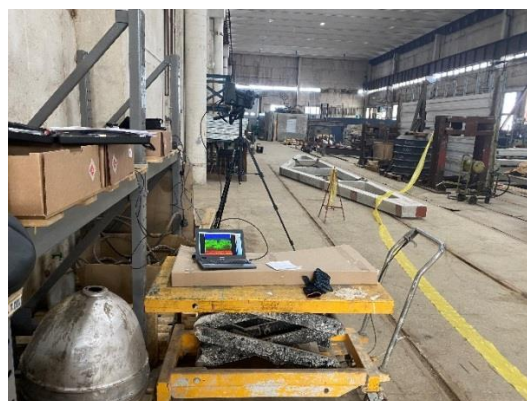
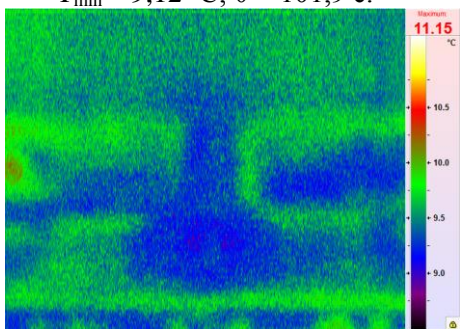
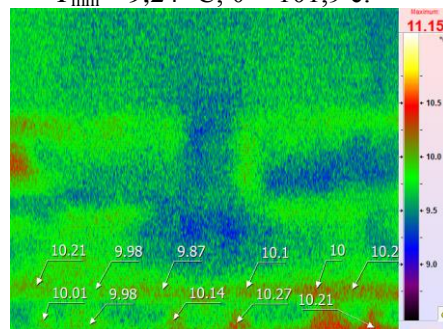


Рисунок 12 – Общий вид образца после испытаний

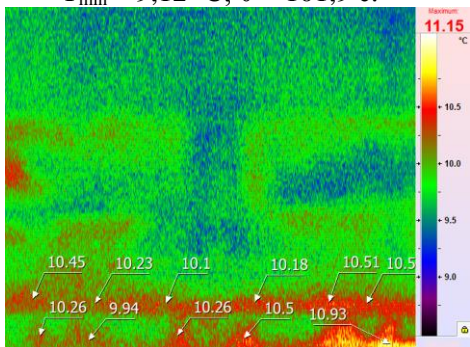
Кадр 58: $T_B = 9,45 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 9,66 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $T_{\min} = 9,12 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с}$.



Кадр 72: $T_B = 9,45 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 10,38 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $T_{\min} = 9,24 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с}$.



Кадр 58: $T_B = 9,45 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 9,66 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $T_{\min} = 9,12 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с}$.



Кадр 58: $T_B = 9,45 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 9,66 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $T_{\min} = 9,12 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с}$. (объемная модель)

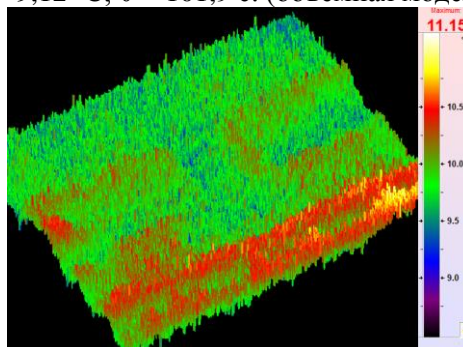
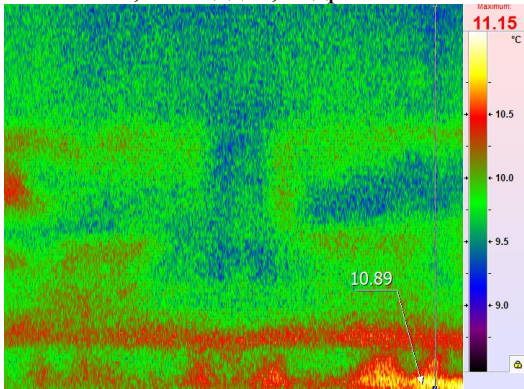
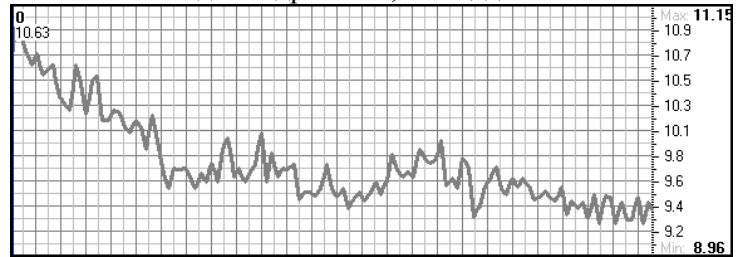


Рисунок 13 – Изменение температурного поля поверхности плиты при ее нагружении в стенде возрастающей нагрузкой от нуля до 200 тонн

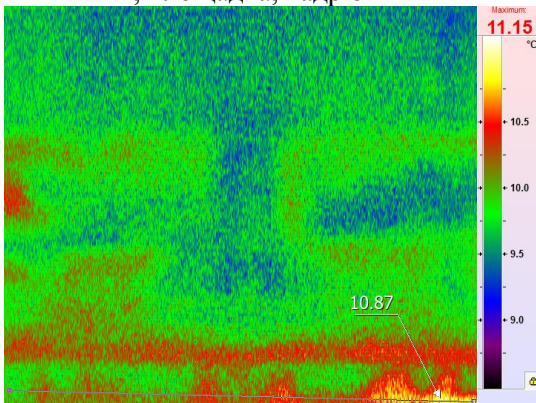
Указание направления и точки измерения, площадка, кадр 82



Температурное поле поверхности для кадра № 82, площадка



Указание направления и точки измерения, площадка, кадр 82



Температурное поле поверхности для кадра № 82, площадка

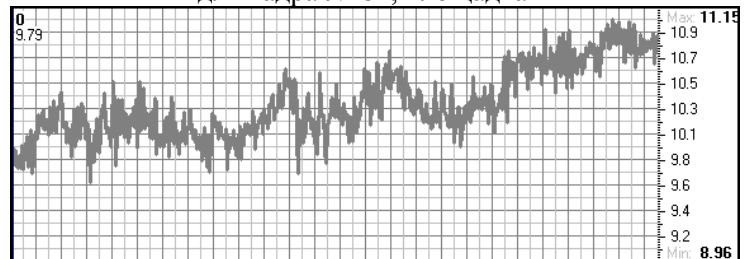


Рисунок 14 – Изменение температурного поля в фиксированных точках поверхности плиты при ее нагружении в стенде возрастающей нагрузкой от нуля до 200 тонн



Рисунок 15 – Общий вид образца во время испытаний

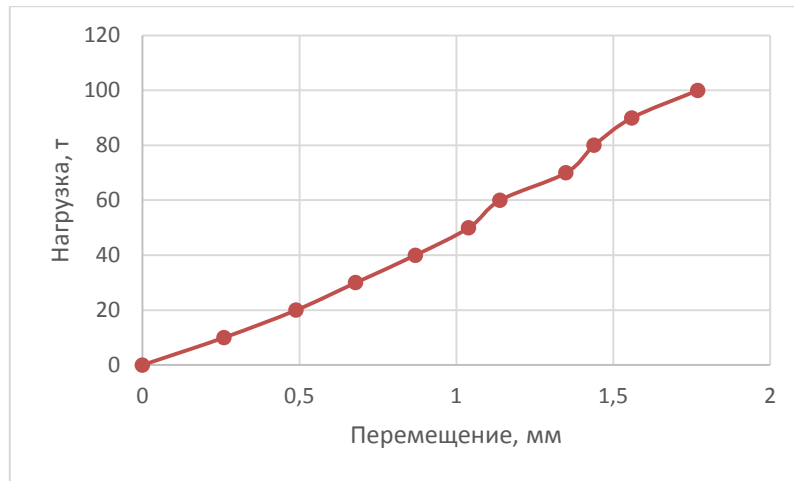


Рисунок 16 – График зависимости перемещения внутренней части образца

Кадр 2: $T_b = 15,15 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 15,86 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $T_{\min} = 14,58 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с}$.

Кадр 1194: $T_b = 15,18 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\max} = 15,92 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $T_{\min} = 14,66 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta = 101,9 \text{ с}$.

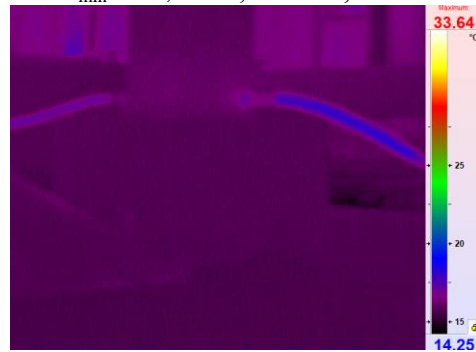
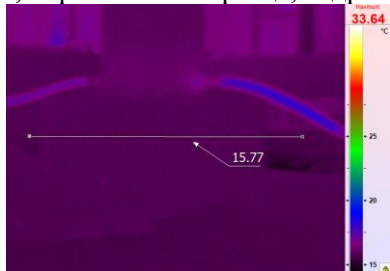
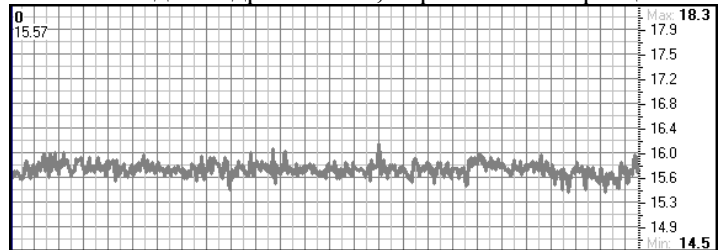


Рисунок 17 – Изменение температурного поля поверхности образца при его нагружении в стенде возрастающей нагрузкой от нуля до 100 тонн

Указание направления и точки измерения, коробчатого образца, кадр 1199



Температурное поле поверхности для кадра № 1199, коробчатого образца



Указание направления и точки измерения, коробчатого образца, кадр 1199



Температурное поле поверхности для кадра № 1199, коробчатого образца

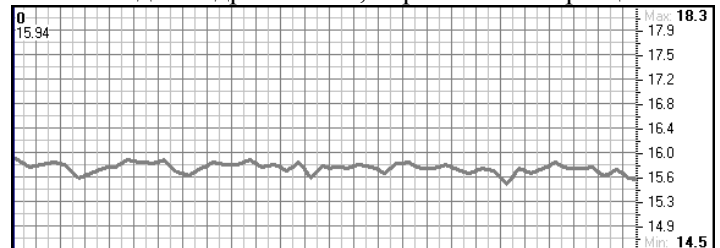


Рисунок 18 – Изменение температурного поля в фиксированных точках поверхности образца при его нагружении в стенде возрастающей нагрузкой от нуля до 100 тонн

Выводы.

Анализ термофильмов температурных аномалий в зонах локализации пластической деформации позволяет с высокой вероятностью определять зоны предельных состояний, зарождение и развитие разрушения в них, выявлять возможные траектории развития разрушения на основе деформационного теплообразования и с использованием компьютерной термографии.

Термография полей деформационных температур комбинированных образцов возможна только в стадии их загрузки или разгрузки. При статическом нагружении исследование дефектов возможно с использованием активных тепловых методов. При тепловом исследовании конструкций и их элементов необходимо строго соблюдать требования к расположению термографа.

Литература:

1. Clark, E. Britannia and Conway Tabular Bridges / Edwin Clark. – London, 1849. – 55 p. – http://books.google.com/books?id=_GsOAAAAYAAJ&oe=UTF-8.
2. Хьюз, О. Ф. Проектирование судовых корпусных конструкций. – Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.
3. Мариев, П. Л. Карьерный автотранспорт стран СНГ в XXI веке / П. Л. Мариев, А. А. Кулешов, А. Н. Егоров, И. В. Зырянов. – СПб: Наука, 2006. – 387 с.
4. Ишков, А. М. Теория и практика надежности техники в условиях Севера / А. М. Ишков, М. А. Кузьминов, Г. Ю. Зудов. – Якутск: ЯФ «Изд-во СО РАН», 2004. – 313 с.
5. Алексеев, Г. П. Справочник конструктора-машиностроителя / Г. П. Алексеев, И. С. Мазовер. – Ленинград. – Судпромгиз. – 1961. – 449 с.
6. Бельчук, Г. А. Сварные соединения в корпусных конструкциях / Г. А. Бельчук // Ленинград: Судпромгиз. – 1969. – 279 с.