

*А.Ю. Карачев*

*Вологодский оптико-механический завод*

*В.Ф. Булавин*

*Вологодский государственный университет*

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Современные системы САПР предоставляют широкие возможности анализировать технические системы при различных воздействиях. Инженерный анализ является одним из этапов автоматизированной конструкторской подготовки производства. В число факторов, определяющих стабильную и надежную работу оптических измерительных приборов в широком температурном диапазоне, входит компенсация тепловых деформаций в механических элементах устройства. Работа связана с моделированием процессов термоупругости и анализом конструкторских решений деталей опто-мехатронных систем на стадии проектирования.

Тепловые деформации, термические напряжения, опто-мехатронные компоненты, термоупругость.

Автоматизированная конструкторская подготовка производства является неотъемлемой частью цифровой экономики. Этот процесс включает в себя 3D-проектирование моделей деталей и узлов изделий, оформление 2D-чертежей и необходимых спецификаций, а также каталогов продукции. Ассоциативная связь цифровых копий и чертежей позволяет учитывать все модификации электронной модели в технических документах [1].

Исследуемая деталь – основание блока, выполненное из алюминиевого сплава АМг6 – является опорной частью сложного оптического прибора. По техническим условиям система должна стабильно работать в температурном диапазоне  $-50^{\circ}\text{C} \div 50^{\circ}\text{C}$ . Критерий работоспособности устройства – постоянство положения оптической оси [2, 3].

При отклонении температуры от нормальных климатических условий ось информационного поля, образованного светоизлучающими элементами, уходит от оптической оси прибора. Смещение этих осей является причиной погрешности измерительного тракта [2, 3]. Цель работы – на стадии проектирования выработать конструкторские решения, обеспечивающие минимальное расхождение этих осей.

Предполагается, что одним из факторов погрешности измерительного канала является температурная деформация опорного основания, поскольку на его базовую поверхность устанавливаются основные опто-мехатронные компоненты. Конструкция детали имеет развитую геометрию (рис. 1). Сложный топологический конструктив определяется принятой оптической схемой прибора: на поверхности детали имеются вытянутые элементы, опорные пластики, технологические, конструктивные и крепежные отверстия. Вырез А является зоной расположения чувствительных опто-электронных компонентов. Температурные деформации в этой области являются причиной возникновения погрешности в работе оптического канала прибора.

Теоретический анализ процессов термоупругости требует решения системы дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Аналитическое решение невозможно ввиду сложной геометрии конструктива детали, поэтому приходится обращаться к численным методам, в частности, методу конечных элементов в рамках платформы Solid Works Simulation [4].

Для получения объективной информации о характере влияния температурных деформаций на степень устойчивости системы при изменении температуры в рамках заданного диапазона выполнена количественная оценка изменения геометрических параметров детали. На рис. 2 показан характер деформаций при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$ .

Результаты вычислительного эксперимента дают информацию о распределении термических напряжений и деформации по объему детали и свидетельствуют об изменении исходной конструктивной геометрии. Максимальные величины перемещений (0,057 мм) сконцентрированы в зоне расположения светоформирующих элементов измерительного прибора. Для минимизации деформаций предлагается рассмотреть следующие варианты решения проблемы:

- конструктивное усиление локальных участков детали, в которых значения возникающих деформаций максимальны;
- замена исходного материала детали на другой с меньшим коэффициентом температурного расширения;
- комбинированный подход, заключающийся в использовании конструктива с ребром жесткости совместно с новым материалом.

Для первого варианта, исходя из жестких требований по конфигурации и размерам блока, предлагается сформировать два ребра жесткости в зонах наибольших деформаций (рис. 3). При этом наблюдаются незначительные расход материала и увеличение массы изделия. Как видно из цветовой диаграммы (рис. 4), значение максимального смещения составля-

ет 0,044 мм, результаты позволяют судить о снижении тепловых деформаций (в 1,3 раза). Предложенный вариант полностью не исключает погрешность в работе измерительного канала.

С целью минимизации возникающих тепловых деформаций и перемещений был проведен статический анализ основания с заменой исходного материала. В качестве материала с меньшим коэффициентом теплового расширения был выбран сплав титана ВТ6 и легированная сталь 30ХГСА.

Перспективным направлением в рамках замены материала является применение прецизионных сплавов. Прецизионный сплав представляет собой струк-

туру с заданными физико-механическими свойствами. В классификации прецизионных сплавов отдельно выделена группа с заданным температурным коэффициентом линейного расширения «инварные сплавы». Это железо-никелевые сплавы, коэффициент теплового расширения которых зависит от процентного содержания никеля. На рис. 5 видно, что сплав 36Н обладает минимальным коэффициентом теплового расширения. Состав предназначен для прецизионных деталей, конструкций и элементов приборов. Он широко применяется в высокоточных измерительных системах космических аппаратов при интервале рабочих температур от  $-196^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ .

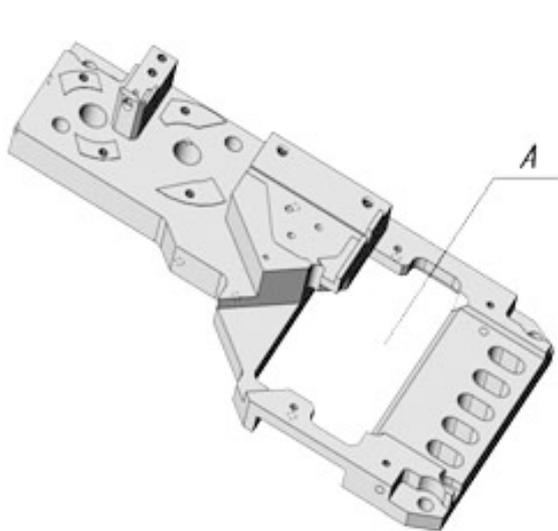


Рис. 1. Исследуемая деталь

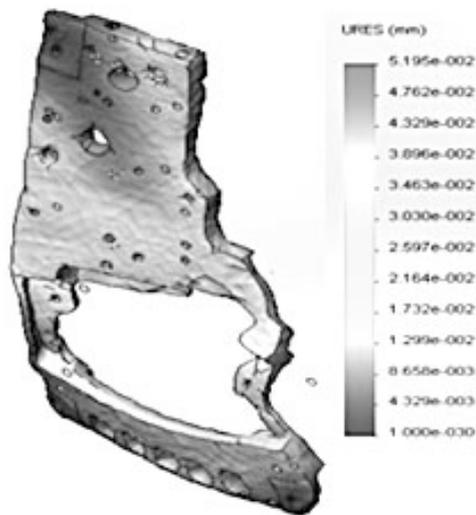


Рис. 2. Деталь, подвергнутая охлаждению  $-50^{\circ}\text{C}$

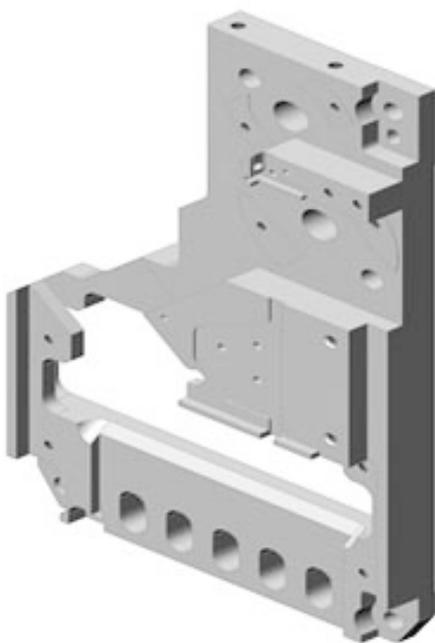


Рис. 3. Формирование ребер жесткости

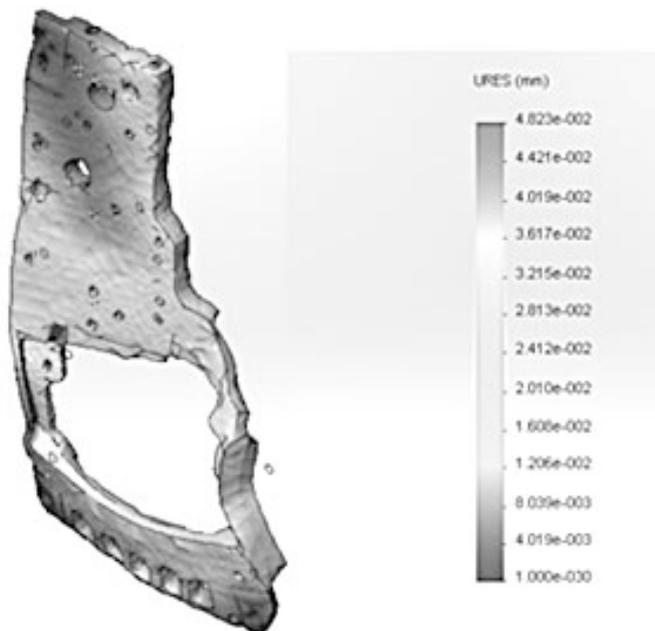


Рис. 4. Результирующее перемещение

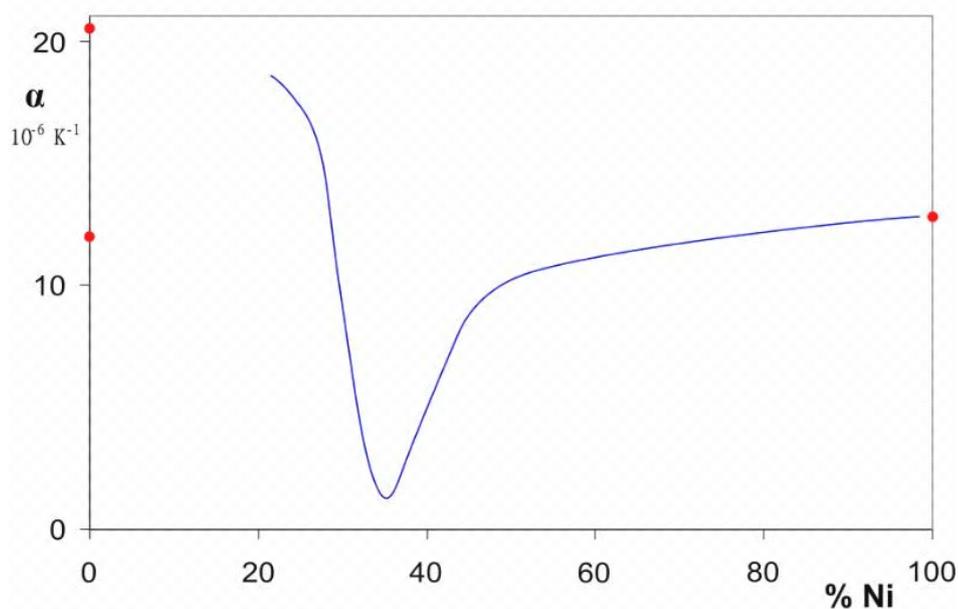


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплового расширения от % содержания Ni

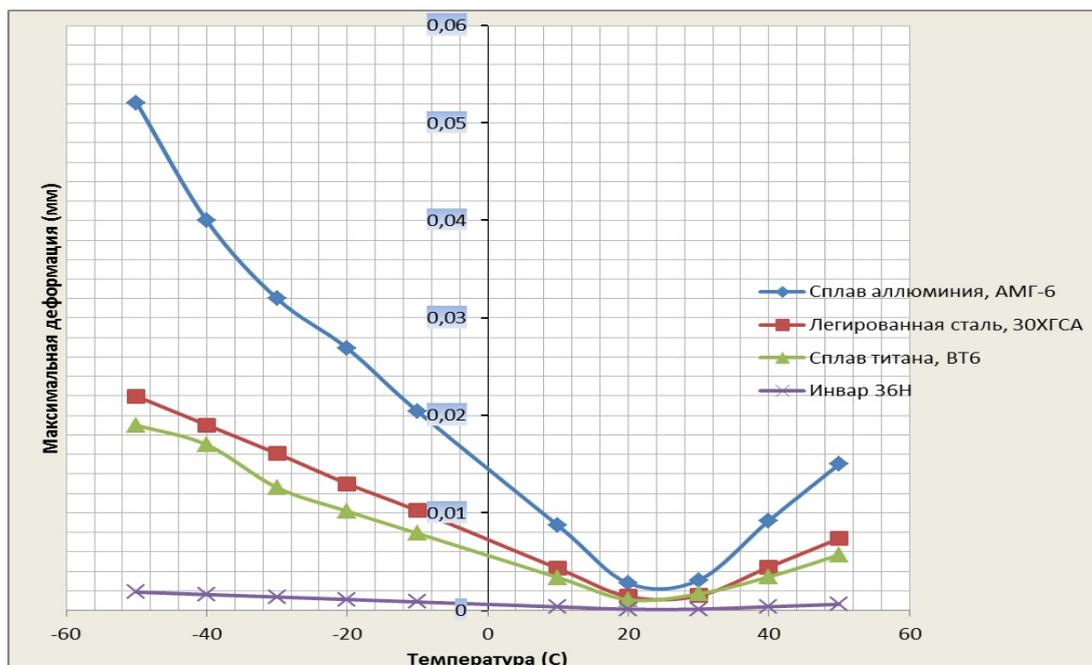


Рис. 6. Зависимость результирующей деформации от температуры

Таблица

**Максимальное перемещение в опасном сечении детали**

AMg6	BT6	30XGSA	36N
0,058 мм	0,019 мм	0,023 мм	0,0032 мм

Результаты исследования на интервале рабочих температур (-50°C ÷ 50°C) группы выбранных материалов представлены на рис. 6. График отображает тепловые деформации на участке с максимальными термическими напряжениями в зависимости от температуры. Из графика следует, что значения максимальной деформации для детали из инвара сплава

36Н ниже, в сравнении с деталями, выполненными из сплава титана, алюминия и стали. Основание, выполненное из прецизионного сплава, будет меньше подвергнуто различным деформациям и перемещениям. Результаты максимальных перемещений в точке концентрации максимальных термических напряжений приведены в таблице.

Изменив конструкцию, а также поменяв исходный сплав детали на прецизионный сплав инвара 36Н, получили следующие результаты вычислительного эксперимента (рис. 7).

Из эпюры видно, что значение максимального перемещения в сравнении с базовым вариантом снизилось в 22,5 раза (0,0025 мм). Данное решение из всех предложенных, является наиболее оптимальным.

Результаты вычислительного анализа подтверждаются натурными испытаниями в термокамере. Данные эксперимента с объектом исследования и установленными светоформирующими элементами фиксировались фоторегистрирующим устройством. На рис. 8 представлена картина информационного

поля оптической системы в базовом варианте конструкции основания при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$ . Изображение дает наглядное представление о смещении оси поля оптических элементов, вследствие возникновения температурных деформаций.

На рис. 9 показано формируемое поле предложенного комбинированного варианта. Несоосность проекционного квадрата с геометрической осью практически не наблюдается. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о возможности снизить пространственные тепловые деформации в детали. Увеличение температуры к предельной величине  $+50^{\circ}\text{C}$  дает аналогичные результаты, т. е. рост значений возникающих тепловых деформаций.

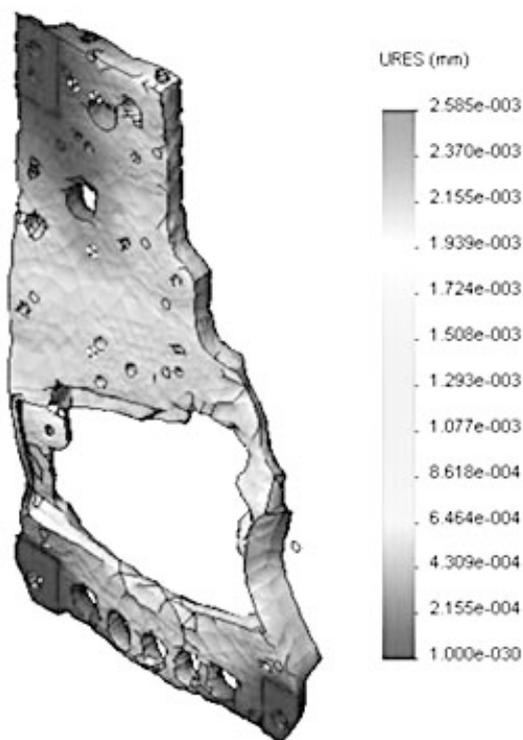


Рис. 7. Результирующие перемещения в комбинированном варианте

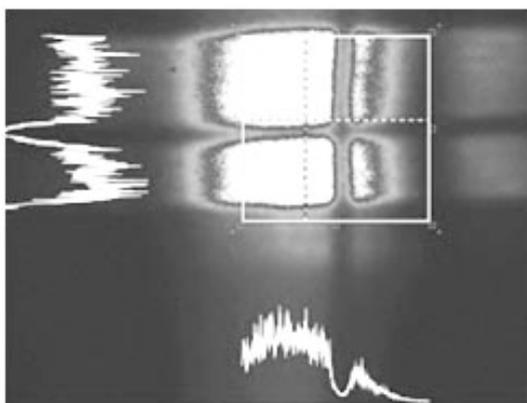


Рис. 8. Формируемое поле при  $-50^{\circ}\text{C}$

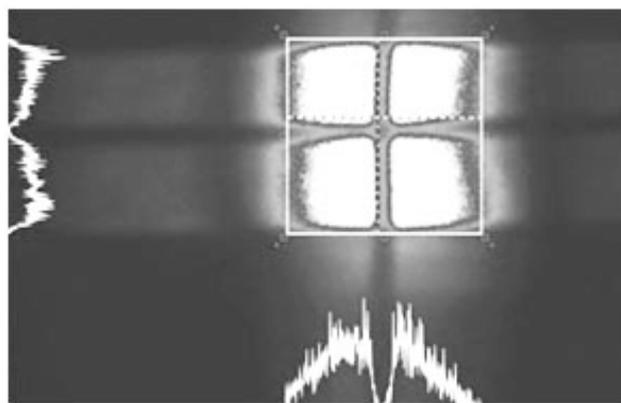


Рис. 9. Формируемое поле комбинированного варианта

## Выводы

Корректность полученных результатов подтверждается исследованиями, проведенными опытным путем. В частности, при пониженных температурах ( $-50^{\circ}\text{C}$ ) наблюдается наибольшая сбиваемость оптической оси. Сравнение результатов, полученных в рамках инженерного анализа, и результатов опытных исследований показывают их соответствие.

Сбиваемость оптической оси является следствием возникающих деформаций в опорном основании. Проблема увода формируемого поля решена за счет изменения как геометрии, так и выбора материала детали «Основание».

Результаты работы позволяют повысить стабильность работы существующей системы, а также могут быть использованы при проектировании геометрии опорных деталей новых приборов.

## Литература

1. Булавин, В. Ф. Валидация САД-продуктов в малых предприятиях машиностроительного сектора / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2017. – № 5 (325). – С. 64–75.
2. Латыев, С. М. Конструирование точных оптических приборов: учебник для вузов / С. М. Латыев. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2007. – 283 с.
3. Михайловский, А. И. Влияние температурного градиента на работу информационно-пеленгационного блока модуля межспутниковой линии связи [Электронный ресурс] / А. И. Михайловский // *Universum. Технические науки: электрон. научн. журн.* – 2016. – № 6 (27). – Режим доступа: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/3311>.
4. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в Solid Works Simulation / А. А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

**A.Y. Karachev, V.F. Bulavin**

## ENSURING THERMAL STABILITY OF OPTICAL SYSTEMS ELEMENTS

Modern CAD systems provide ample opportunities to analyze technical systems under various impacts. Engineering analysis is one of the stages of automated design preparation of production. The number of factors that determine the stable and reliable operation of optical measuring instruments in a wide temperature range includes compensation of thermal deformations in the mechanical elements of the device. The work is related to the modeling of thermoelasticity processes and the analysis of design solutions for the details of opto-mechatronic systems at the design stage.

Thermal deformation, thermal stresses, opto-mechatronic components, thermoelasticity.