

УДК 681.7.068



Д.А. Воробьев, В.Ф. Булавин, Т.Г. Булавина
Вологодский государственный университет

ЦИФРОВОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В работе показана реализация конструкторских CAD/CAE решений для узлов оптических систем. Обеспечение стабильной работы в широком диапазоне температур информационных оптических приборов контроля окружающей среды и измерения физических параметров достигается на конструкторском уровне снижением влияния тепловых деформаций. Это достигается путем оптимизации геометрии опорных узлов и выбора материала заготовки. Автоматизация конструкторско-технологических проектов осуществляется на базе CAD-/CAE-платформ.

Цифровое производство, инжиниринг, информационные системы, тепловые деформации.

Цифровое производство опирается на развитие экономики в направлении положений идеологии «Индустрия 4.0/5.0» [1, 2]. Ключевая роль в подготовке материального производства отводится системам интеллектуального проектирования в ходе конструкторско-технологических этапов. Такие системы базируются на CAD-/CAPP-/CAM-/CAE-/CAO-платформах.

Цель работы – продемонстрировать реализацию цифровых производственных технологий в среде малых и средних приборостроительных предприятий и масштабирование компетенции в области CAD-/CAE-моделирования и проектирования.

Для оптических информационно-измерительных систем предъявляются жесткие требования к механическим узлам, что обусловлено необходимостью обеспечения геометрической точности для всех поверхностей деталей и их взаимной ориентации между собой. Одним из наиболее важных технологических аспектов в процессе изготовления и эксплуатации изделия является стабильность конструктивных форм и геометрических размеров узлов и деталей при воздействии различных климатических факторов [3, 4].

Узел оптического прибора представлен платформой излучающей системы (рис. 1). На базовую поверхность детали «Основание» устанавливаются составные части из общей сборки измерительного канала. Деталь имеет сложную топологическую геометрию, что определяется особенностью конструктивной схемы прибора. На поверхности изделия имеются опорные пластики, технологические и конструктивные элементы. Крепление узла в общую сборку прибора осуществляется тремя цилиндрическими винтами, для чего в опорной части предусмотрены соответствующие отверстия.

Вырез А (рис. 1) является областью расположения светоизлучающих оптоэлектронных компонентов. Термоабберация светового потока в этой области, связанная с климатическими факторами, обуславливает возникновение погрешности в работе информационного оптического канала [3, 4].

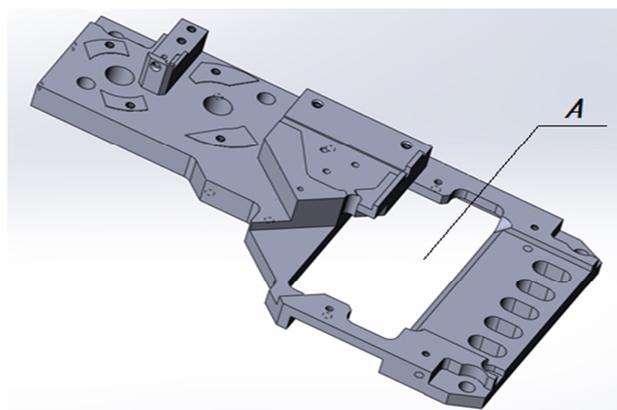


Рис. 1. Основание излучающей системы

Методы проектирования. Цифровой формат выполнения проектов при конструкторско-технологическом сопровождении предполагает: разработку 3D-двойников деталей, визуализацию узлов и сборок изделий, автоматизированное технологическое обеспечение. Методология проектирования – реализация методов 3D-визуализации и моделирования, а также инжиниринг через функционал CAD-/CAPP-/CAO-/CAE-приложений [5–12].

В ходе выполнения проекта обязательным условием является инжиниринговое обеспечение для прочностного и термодинамического моделирования деталей и узлов. Для оценки распределения тем-

пературных деформаций в объеме детали необходимо провести имитационные испытания с применением САЕ-системы [5–12].

САЕ-моделирование. Составной частью конструкторского этапа подготовки является создание 3D-прототипов всех деталей с формированием рабочих чертежей и отображением всех сопровождающих атрибутов [5–12]. На рисунке 1 представлен 3D-двойник детали «Основание».

Физические свойства материалов в элементах конструкции при заданных габаритах и конфигурации могут отличаться от тех, которые планировались на этапе технического задания. Как следствие, получаемые прочностные свойства детали оказываются ниже тех, что предсказаны по стандартным механическим характеристикам. К числу мероприятий, позволяющих решить проблемы термодформаций, относятся конструктивные изменения деталей, использование специальных сплавов и элементов охлаждения и компенсации перемещений [3, 4].

Алгоритм виртуального эксперимента в САЕ-модуле включает в себя: импорт трехмерной модели детали из САД-системы; задание основных физических свойств материала; закрепление исследуемой детали в местах фиксации детали в реальном приборе; приложение нагрузок и настройка системы измерения; разбиение модели на конечные элементы (КЭ) с созданием сетки; анализ полученных результатов.

Заданные параметры сетки (max и min размеры КЭ, тип сетки, используемое разбиение) и высокая плотность разбиения в областях детали, где возможны максимальные деформации, позволяют получить приемлемые результаты. Конечно-элементная модель де-

тали «Основание», полученная в САЕ-платформе, представлена на рисунке 2. Достоверность эксперимента напрямую зависит как от постановки задачи, так и от параметров сетки.

При формулировании математической модели приняты во внимание следующие допущения: расчет производится при условии равномерного нагрева; предполагается изотропность материала; отсутствуют остаточные напряжения в материале детали [5–12].

Результат инжиниринга визуализируется полем, характеризующим распределение напряжений, деформаций и перемещений с лентой числовых значений. На рисунках 3 и 4 представлены данные моделирования при температуре $t=-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ детали «Основание».

Результаты свидетельствуют о том, что значения термонапряжений находятся в зоне допустимых (меньше предела текучести) величин, а цветовая легенда деформаций в модели позволяет выявить наиболее опасное сечение в детали. Выводы находят подтверждение из данных по эквивалентным перемещениям в области расположения светозадающих элементов прибора.

Значение максимальной деформации наблюдаем из рисунка 4: максимальная величина составляет $\sim 0,00335$, а минимальная $\sim 0,00003$.

Значение максимального перемещения $0,054\text{ мм}$. Минимальное перемещение наблюдается около наружных граней, там, где деталь конструктивно наиболее надежна. Значение минимального перемещения $0,001\text{ мм}$. Все изображения модели на рисунках показаны в масштабе деформируемого состояния.

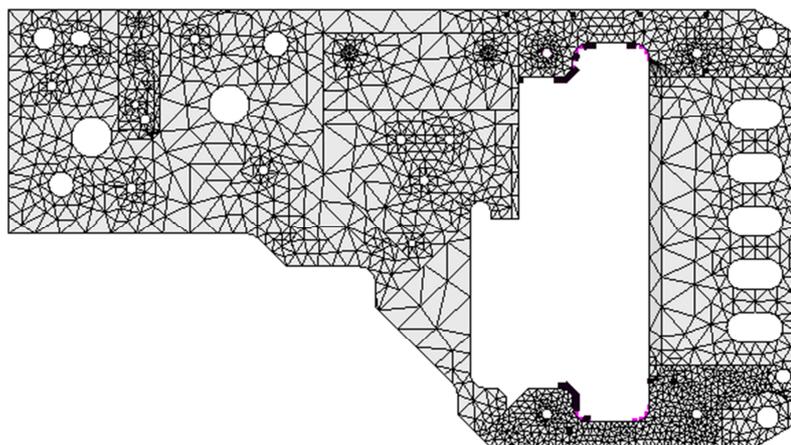


Рис. 2. Результат разбиения модели на конечные элементы

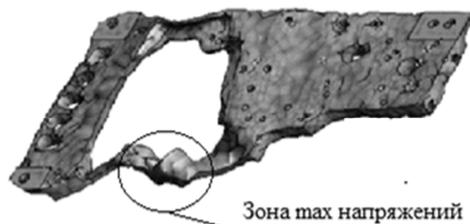


Рис. 3. Карта распределения напряжений в изделии (сплав АМГ-6)

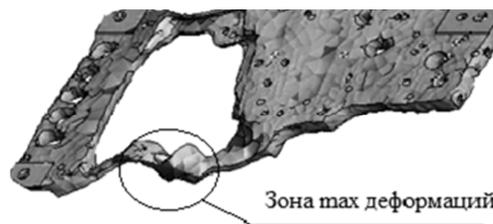


Рис. 4. Карта распределения деформаций в изделии (сплав АМГ-6)

Результаты инженерного анализа базовой конфигурации детали

t, (°C)	-50	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	50
URES max, (мм)	0,052	0,040	0,032	0,026	0,02	0,008	0,002	0,003	0,009	0,015

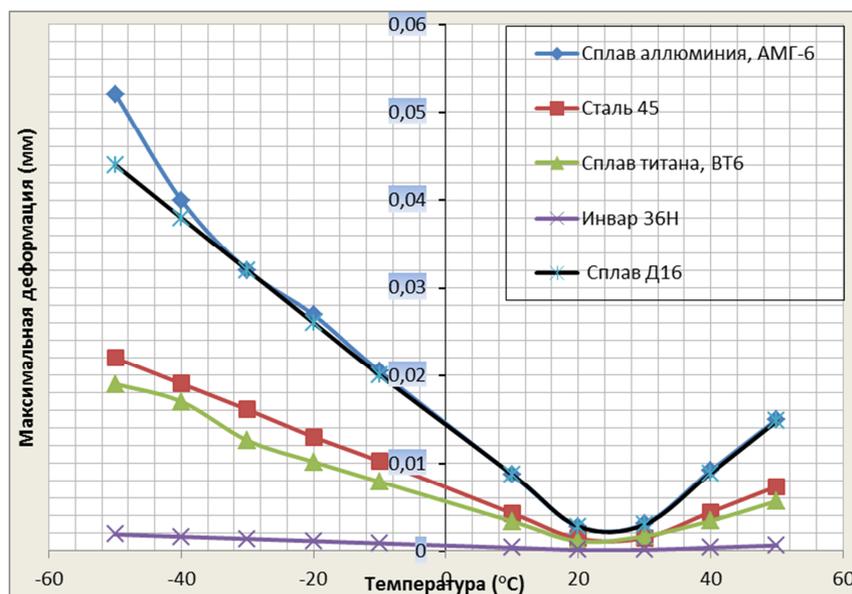


Рис. 5. Результаты исследования деформаций в опасном сечении при различных материалах исполнения детали «Основание»

Для представления полной картины возникающих искажений в опасной зоне необходимо моделирование термдеформаций детали во всем температурном диапазоне ($-50\text{ °C} \div +50\text{ °C}$). Шаг, с которым проводились испытания, составляет 10 °C . Результаты исследования приведены в таблице.

В первой строке записана температура, при которой проводилось моделирование. Вторая строка представляет значения максимального перемещения в точке наибольших температурных деформаций.

На основании проведенного инженерного анализа в САЕ-модуле делаем следующее заключение:

- ✓ в результате температурного воздействия изначальная геометрия детали «Основание» нарушается;
- ✓ наблюдаем максимальные деформации и перемещения на участке расположения источника излучения;
- ✓ нестабильность в геометрии формы детали в этой зоне приведет к оси светового потока и погрешности на выходе измерительного канала;
- ✓ материал (сплав АМГ-6) является неприемлемым в базовой конфигурации детали прибора при воздействии температурных нагрузок.

Подбор материала заготовки. Вопрос выбора материала заготовки изделия может быть решен путем многовариантного САЕ-моделирования для базовой геометрии детали, выполненной из сплавов с различными коэффициентами температурного расширения [5–12]. На рисунке 5 даны кривые, полученные

при симуляции тепловых деформаций в температурном диапазоне $-50\text{ °C} \div +50\text{ °C}$.

Анализ показывает, что наибольшая прецизионность наблюдается в конструкции, выполненной из инварного сплава 36Н. При этом значение максимального перемещения составляет $0,0018\text{ мм}$, что в ~ 30 раз меньше результатов в базовом варианте. Удаление максимального значения деформации до минимальной величины составляет $\sim 0,0005\text{ мм}$, что в сравнении с предыдущими материалами показывает наилучшую размерную стабильность.

Минимизация температурных и остаточных деформаций. Требования к постоянству геометрической формы и размеров деталей должны обеспечиваться при длительной эксплуатации во всем температурном диапазоне работы прибора. Решение такой задачи сопровождается конструкторско-технологическими средствами. К ним относятся: усиление ослабленных зон путем добавления ребер жесткости, разбиение базового варианта детали на части с целью исключения областей, в которых наблюдаются максимальные деформации, использование сплавов с меньшим коэффициентом температурного расширения и высокой стабильностью фазового и структурного состояния. Далее, при технологических операциях использование специальных методов стабилизирующей обработки, применение операций для снятия остаточных напряжений внутри деталей, возникающих при механической обработке, и комбинирование сочетаний всех перечисленных мер [3, 4].

Наконец, снижение вредных остаточных напряжений увеличивает срок службы деталей и их надежность во время использования [13].

Конструктивная доработка детали. Жесткость деталей является одним из показателей качества оптических приборов. Недостаточная жесткость приводит к потере точности при металлообработке, что влияет на рабочие свойства прибора. Повышение этого параметра без существенного увеличения массы возможно следующими конструктивными методами: замена изгиба растяжением/сжатием; увеличение моментов инерции критических сечений; усиление зон перехода от одного сечения к другому; расстановка опорных стенок для деталей, работающих на изгиб; введение поперечных и диагональных связей [3, 4].

Упрочнение деталей конструкции за счет снижения внутренних напряжений можно достичь за счет применения ребер жесткости в наиболее нагруженных областях. Ребра жесткости дают возможность обеспечить размерную стабильность детали без существенных доработок и без дополнительных трудозатрат. Эти конструктивные элементы используются в целях стабильности основных эксплуатационных свойств, уменьшения напряжений в тонкостенных деталях. Ребра жесткости распределяют нагрузки по длине и площади, обеспечивают равенство детали, что важно при технологическом процессе механообработки. При этом наблюдается незначительное увеличение массы изделия [3, 4].

Соблюдая требования по конфигурации, осуществлена модификация геометрии детали «Основание» в зонах наибольших деформаций. Результат конструктивных доработок представлен на рисунке 6.

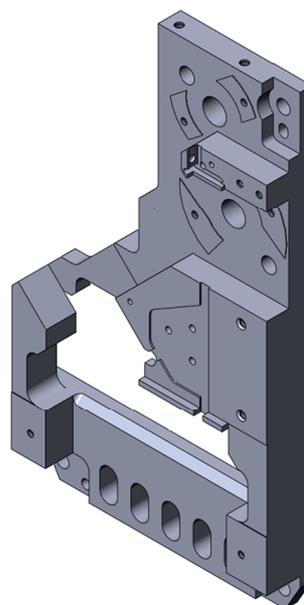


Рис. 6. Модифицированная геометрия детали «Основание» с усилением деформируемых зон

Данное конструктивное решение не влечет изменений приборного узла измерительного комплекса, изменения заготовки детали, также не приводит к пересмотру технологии процесса сборки и юстировки блока. Предлагаемый вариант усиленной конструкции не нарушает критерия технологичности.

Результаты моделирования модифицированного варианта детали с позиции максимальных деформаций во всем температурном диапазоне представлены на рисунке 7. Отмечается снижение на ~30 % критического показателя в области низких температур для сплава АМГ-6.

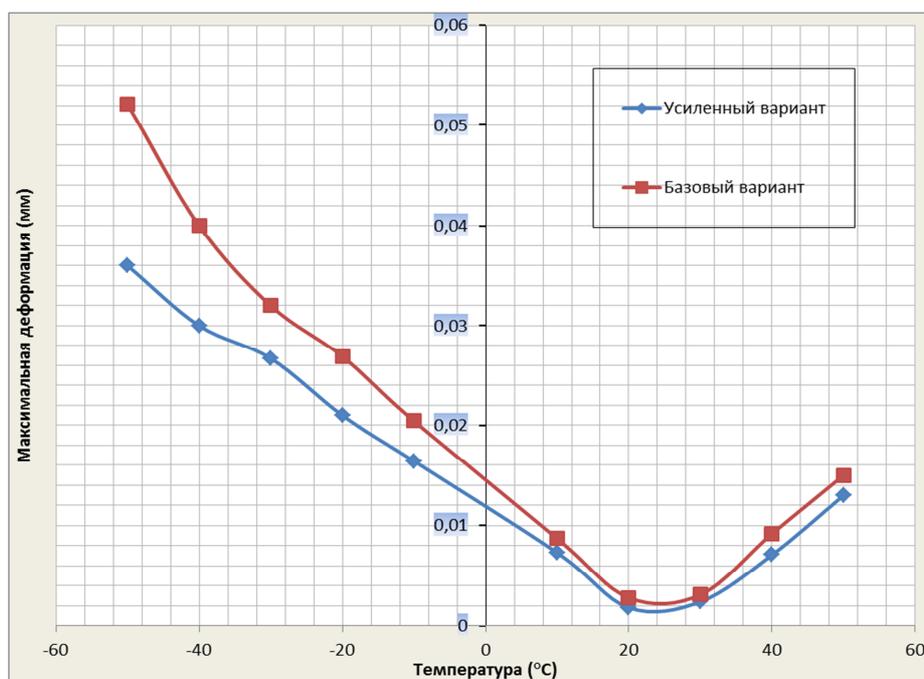


Рис. 7. Результаты инжиниринга усиленного и базового вариантов конструкции (сплав АМГ-6)

Доработка изделия с уровня конструкторского сопровождения продолжается на этапе технологического обеспечения. Несмотря на приемлемые показатели для некоторых материалов при окончательном выборе сплава заготовки необходимо принять во внимание технологические, стоимостные и другие факторы. Окончательный выбор материала детали может быть сделан после испытаний в климатической камере как отдельного светоформирующего блока, так и всего измерительного комплекса. С технологической точки наиболее перспективным, вероятно, является сплав Д16.

Заключение

1. Выполненные исследования по моделированию и контролю термической стабильности при производстве элементов информационных оптических приборов демонстрируют эффективные подходы на основе интеллектуальных инженерных CAE-платформ.

2. Углубление компетенций в области цифрового проектирования и моделирования конструкторов и технологов приводят к повышению автоматизации и интеллектуализации труда, позволяют выполнять проекты в более короткие сроки и с улучшенными техническими показателями.

3. В рамках решения исходной задачи наглядность полученных результатов добавляет к методологии инжиниринга прецизионных узлов оптических измерительных систем дополнительную универсальность.

Литература

1. Боровков, А. И., Рябов, Ю. А. Перспективные направления развития передовых производственных технологий в России // Материалы XVII Апрельской междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 19–22 апр. 2016 г. – Москва : НИУ ВШЭ, 2017. – Т. 3. – С. 381–389.

2. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. Рабочий доклад Департамента корпоративного обучения Московской школы управления «Сколково», ноябрь 2017. – URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf (дата обращения: 27.03.2024).

3. Латыев, С. М. Конструирование точных (оптических) приборов : учебное пособие. – Санкт-Петербург : Политехника, 2007. – 579 с.

4. Латыев, С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах. – Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 248 с.

5. Булавин, В. Ф. Политика цифровых технологий на малых машиностроительных предприятиях / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев, А. С. Степанов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2019, № 9. – С. 35–45, DOI: 10.18698/0536-1044-2019-9-35-45.

6. Булавин, В. Ф. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Ч. II. Технологический этап / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев, А. С. Степанов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2020, № 3. – С. 250–256. doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-3-250-256

7. Bulavin, V. F. Digital design and technological innovation in the small machine building sector / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, V. V. Yahrichev, A. S. Stepanov, N. S. Grigoriev // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series, 2020, vol. 939, pp. 012016, DOI:10.1088/1757-899X/939/1/012016.

8. Bulavin, V. F. Digital Space of Small Enterprises in Engineering / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, A. S. Stepanov // Lecture notes in networks and systems (Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)). – 2021. – V. 2– P. 462-468. doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_54.

9. Булавин, В. Ф. CAO/CAE-инженерное сопровождение производства малых предприятий / Т. Г. Булавина, Д. В. Кошутин, И. С. Петряшов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2022, – № 8. – С. 47–54. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-8-47-54.

10. Булавин, В. Ф. Цифровые технологические инновации в малых машиностроительных предприятиях / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2024. – № 2 (24). – С. 55–58.

11. Булавин, В. Ф. CAD-автоматизация проектирования на малых предприятиях / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2022. – № 2 (16). – С. 48–50.

12. Булавин, В. Ф. Цифровое проектирование в малых машиностроительных предприятиях / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2022. – № 4 (18). – С. 50–52.

13. Цифровые интеллектуальные экосистемы в экономике и промышленности: монография под ред. д-ра экон. наук, проф. А. В. Бабкина. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 398 с.

*D.A. Vorobyov, V.F. Bulavin, T.G. Bulavina
Vologda State University*

DIGITAL DESIGN SUPPORT FOR INSTRUMENT MANUFACTURING

The paper shows the implementation of CAD/CAE design solutions for optical system nodes. Ensuring stable operation in a wide temperature range of information optical devices for environmental monitoring and measurement of physical parameters is achieved at the design level by reducing the influence of thermal deformations. This is achieved by optimizing the geometry of the support nodes and choosing the material of the workpiece. Automation of design and technological projects is carried out on the basis of CAD/CAE platforms.

Digital manufacturing, engineering, information systems, thermal deformations.