

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

К. В. Кривун¹✉, А. А. Пещерова¹, А. А. Лазарева²

¹АО ГНЦ «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша»,
Россия, 125438, г. Москва, ул. Онежская, 8

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

✉ krivun0200@mail.ru

Работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния ответственных разъемных соединений (шпоночных и резьбовых) твердотопливных ракетных двигателей. Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния ответственных узлов в ракетной технике (на примере резьбового и шпоночного соединений) на основе сравнительного анализа результатов численного моделирования в ANSYS и натурного эксперимента методом фотоупругости.

Для обеспечения высокой надежности конструкций предложен комплексный подход, сочетающий конечно-элементное моделирование в ANSYS и экспериментальную валидацию поляризационно-оптическим методом. Научная новизна заключается в получении уточненных данных о напряженном состоянии исследуемых узлов за счет внедрения алгоритма «виртуальной фотоупругости» для прямой количественной валидации расчетов. В качестве эффективного технологического инструмента для создания оптических моделей применена 3D-печать. Выявлены критические локальные концентраторы напряжений во впадинах резьбы и углах пазов.

Результаты показали высокую сходимость численного и натурного экспериментов (относительная погрешность составила 0,57 % для резьбового соединения, а также 3,4 % — для шпоночного), что подтверждает корректность расчетных моделей. Практическая значимость работы заключается в том, что апробированная методика может применяться как на ранних стадиях проектирования, так и для прочностной оптимизации геометрии существующих конструкций.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, фотоупругость, разъемные соединения, твердотопливный ракетный двигатель, концентрация напряжений, интерференционные полосы, аддитивные технологии

Для цитирования: Кривун К. В., Пещерова А. А., Лазарева А. А. Численно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния разъемных соединений ракетных двигателей. Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2026. Т. 10, № 2. С. 76–85. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-76-85>. EDN: LDEEZN.



© Кривун К. В., Пещерова А. А., Лазарева А. А., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF DETACHABLE JOINTS OF ROCKET ENGINES

K. V. Krivun¹✉, A. A. Pescherova¹, A. A. Lazareva²

¹JSC SSC "Keldysh Research Center", Onezhskaya St., 8, Moscow, 125438, Russia

²Moscow Aviation Institute (National Research University),
Volokolamskoe Rd., 8, Moscow, 125993, Russia

✉ krivun0200@mail.ru

The paper investigates the stress-strain state of critical detachable joints (keyed and threaded) in solid-propellant rocket motors. The purpose of the research is to study the stress-strain state of critical components in rocket technology (using the example of threaded and keyed joints) based on a comparative analysis of the results of numerical modeling in ANSYS and field experiments using photoelasticity.

The authors propose a comprehensive approach to ensure high reliability, combining finite element modeling in ANSYS with experimental validation via the photoelastic method. The scientific novelty of the research consists in acquiring more accurate data regarding the stress state of the components under study by introducing a "virtual photoelasticity" algorithm for direct quantitative validation of numerical results. Furthermore, 3D-printing is utilized as an efficient technological tool for the manufacturing of optical models. Critical stress concentrators are identified in thread roots and keyway corners.

Results demonstrate high convergence between numerical and physical experiments (the relative error is 0.57 % for the threaded connection and 3.4 % for the keyed connection), confirming the accuracy of the calculation models. The practical significance of the work is that the tested methodology can be used both in the early stages of design and for the strength optimization of the existing structures geometry.

Keywords: stress-strain state, finite element method, photoelasticity, detachable joints, solid propellant rocket engine, stress concentration, interference fringes, additive technologies

For citation: Krivun K. V., Pescherova A. A., Lazareva A. A. Numerical and experimental research of the stress-strain state of detachable joints of rocket engines. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2026;10(2):76–85. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-76-85>. EDN: LDEEZN. (In Russ.).



© Krivun K. V., Pescherova A. A., Lazareva A. A., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

С развитием отечественной ракетной техники возрастают требования к прочности и надежности твердотопливных ракетных двигателей (РДТТ). Особую актуальность приобретает точная оценка напряженно-деформированного состояния нагруженных разъемных соединений, приводящее к разгерметизации или разрушению конструкции из-за локальных концентраторов напряжений.

Хотя основным инструментом прочностного анализа сегодня выступает численное моделирование, высокая ответственность подобных узлов требует экспериментальной валидации расчетной модели. Одним из способов выявления зон концентрации является поляризационно-оптический метод (фотоупругость), позволяющий получать непрерывное поле напряжений [1]. Научная новизна работы заключается в исследовании зон концентрации напряжений в разъемных узлах РДТТ с помощью комплексного подхода. Он объединяет конечно-элементный анализ с алгоритмом «виртуальной фотоупругости» и экспериментальную валидацию.

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния ответственных узлов в ракетной технике (на примере резьбового и шпоночного соединений) на основе сравнитель-

ного анализа результатов численного моделирования в ANSYS и натурного эксперимента методом фотоупругости.

Задачи исследования:

- 1) проведение численного моделирования напряженно-деформированного состояния соединений в Ansys Mechanical;
- 2) изготовление геометрически подобных моделей соединений РДТТ из оптически чувствительного материала с применением современных аддитивных технологий (3D-печати оснастки) и литья;
- 3) валидация результатов численного моделирования проведением модельного эксперимента на основе фотоупругости на установке ППУ-7;
- 4) реализация методики «виртуальной фотоупругости» для визуализации интерференционных картин, имитирующих прохождение поляризованного света.

Численное исследование напряженно-деформированного состояния разъемных соединений Описание расчетной модели

В ходе работы рассмотрены разъемные соединения корпусов: шпоночное и резьбовое соединения (рис. 1) [2]. Физико-механические характеристики

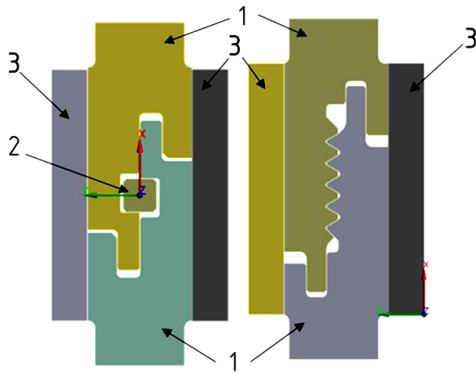


Рис. 1. Конструктивные элементы расчетной модели:

- 1 — фланец корпуса (ЭД-20);
2 — шпоночный элемент (ЭД-20);
3 — фиксаторы перемещений
- Fig. 1. Design elements of the calculation model:
1 — body flange (ЭД-20); 2 — key element (ЭД-20);
3 — displacement stops

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

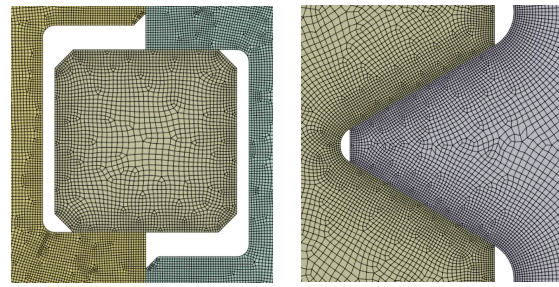


Рис. 2. Конечно-элементная модель

Fig. 2. Finite element model

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

материалов, использованных при моделировании, представлены в табл. 1.

Контрольными параметрами при численном моделировании задачи стали значения максимальных и минимальных главных напряжений (σ_1 , σ_3) и качественная картина эквивалентных напряжений по Мизесу $\sigma_{\text{экв}}$. Для устойчивости модели в дальней-

шем проводимом эксперименте вводятся дополнительные поперечные ограничительные фиксаторы, исключающие смещения вдоль ОУ.

Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи представляет собой плоскую 2D-модель plane stress (10 mm), которая включает определенные условия. Граничные условия:

— ограничение перемещений фиксаторов по торцам в направлении ОХ и ОУ;

— ограничение перемещений нижней части фланцевого соединения в направлении ОУ и ОХ.

Нагрузки, действующие на расчетную модель:

— приложение действующих усилия на верхнюю часть фланцевого соединения в количестве 500 Н;

Таблица 1. Физико-механические характеристики материалов
Table 1. Physical and mechanical features of materials

№	Деталь	Плотность, кг/м³	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Неметаллические разъемные соединения (для модельного эксперимента)				
1	Фланец корпуса (ЭД-20)	1200	3000	0,37
2	Шпоночный элемент (ЭД-20)			
3	Фиксаторы перемещений	1200	2000	0,35

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

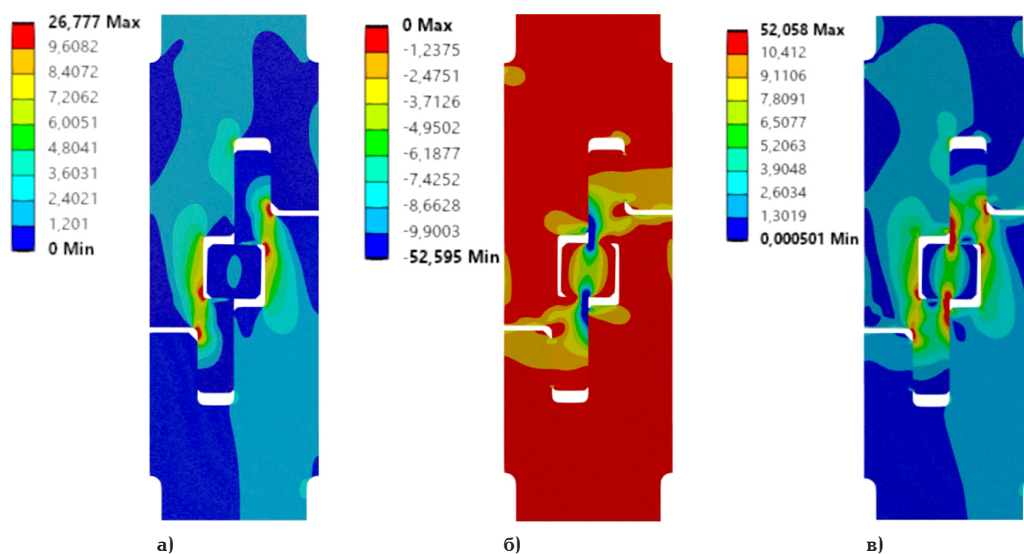


Рис. 3. Результаты численного расчета шпоночного соединения:

- а) — максимальные главные напряжения, МПа; б) — минимальные главные напряжения, МПа;
в) — эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа

Fig. 3. Results of numerical calculation of the keyway joint:

- а) — maximum principal stresses, МПа; б) — minimum principal stresses, МПа;
в) — Mises equivalent stresses, МПа

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

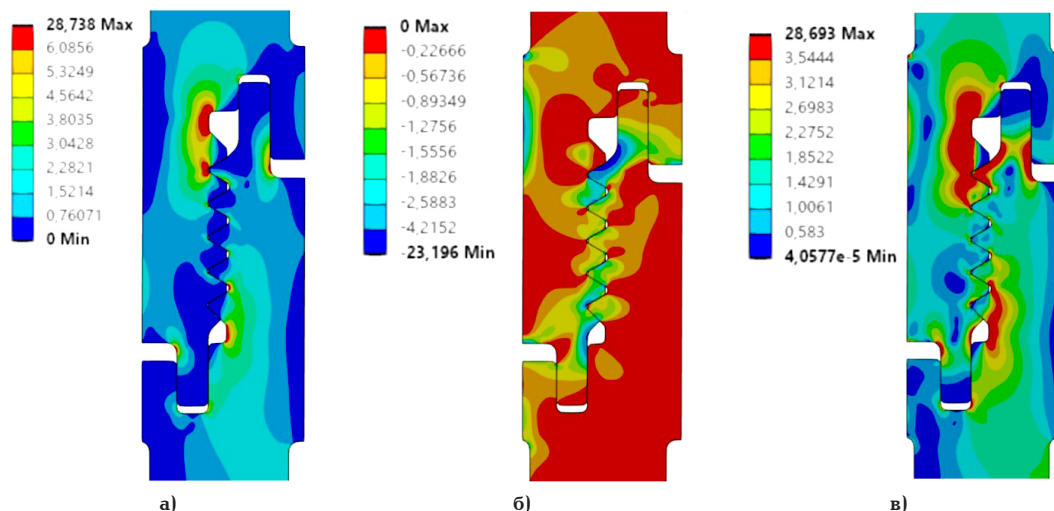


Рис. 4. Результаты численного расчета резьбового соединения:
а) — максимальные главные напряжения, МПа; б) — минимальные главные напряжения, МПа;
в) — эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа

Fig. 4. Results of numerical calculation of the threaded connection:
а) — maximum principal stresses, MPa; б) — minimum principal stresses, MPa;
в) — Mises equivalent stresses, MPa

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

— действие инерционной нагрузки (ускорение свободного падения).

Тип контакта — стандартный (Frictional) с коэффициентом трения 0,2. Допущения:

- не учитывалось температурное воздействие;
- материалы приняты изотропными.

Задачи решались с учетом геометрической и физической нелинейности. Дискретная модель: сеточные модели содержат квадратичные (8 узлов) четырехугольные элементы (Plane183). В случае шпоночного соединения конечно-элементная сетка составила 240 098 узлов, в резьбовом соединении — 411 200 узлов. Данные значения установлены после исследования чувствительности результатов максимальных эквивалентных напряжений к размеру сетки. На рис. 2 представлена сетка характерных мест рассматриваемых конструкций.

Шпоночное соединение

На границах между деталями расчётной модели задавалось контактное взаимодействие стандартного типа (Frictional). Результаты расчета по критериям: максимальные и минимальные главные напряжения (рис. 3а, б); качественная картина эквивалентных напряжений по Мизесу (рис. 3в).

Резьбовое соединение

На границах между деталями расчётной модели задавалось контактное взаимодействие стандартного типа (Frictional). Результаты расчета по критериям: максимальные и минимальные главные напряжения (рис. 4а, б); качественная картина эквивалентных напряжений по Мизесу (рис. 4в).

Валидация результатов численного моделирования

Несмотря на высокую точность современных программных комплексов конечно-элементного анализа, результаты численного моделирования требуют валидации. Особенно критичным является анализ зон концентраторов напряжений (впадины резьбы, проточки, канавки, углы шпоночных пазов).

Теоретические сведения

Для валидации полученной численной модели был выбран метод фотоупругости. Его ключевыми преимуществами для данной задачи являются:

1. Получение непрерывного поля напряжений. В отличие от тензометрии, которая дает значения только в точке приложения датчика, фотоупругость позволяет увидеть картину распределения напряжений по всему сечению детали сразу.

2. Визуализация градиентов. Картина интерференционных полос наглядно показывает места резкого изменения напряжений (частота появления полос), что позволяет локализовать концентраторы.

Метод фотоупругости (поляризационно-оптический метод) основан на свойстве прозрачных изотропных материалов приобретать оптическую анизотропию под действием механических нагрузок. Это явление называется искусственным двойным лучепреломлением [3, 4].

По выходу из модели между этими двумя лучами накапливается оптическая разность хода (Δ), зависящая от разности главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$). Эта зависимость описывается равенством (1), известным как уравнение Вертгейма:

$$\Delta = C \cdot h \cdot (\sigma_1 - \sigma_3), \quad (1)$$

где Δ — оптическая разность хода лучей, м; C — оптический коэффициент напряжения (упруго-оптическая постоянная), зависящий от химического состава материала модели, $\text{м}^2/\text{Н}$; h — толщина плоской модели, м; $(\sigma_1 - \sigma_3)$ — разность главных напряжений в данной точке модели, Па.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились на поляризационно-проекторной установке ППУ-7. Оптическая схема установки (рис. 5) позволяет просветить прозрачные модели поляризованным светом и проецировать картину полос на экран [5–11].

Разность хода Δ лучей, выходящих из модели, при их интерференции в анализаторе полярископа приводит к образованию на экране картины полос.

При просвечивании модели белым светом разность хода вызывает гашение определенных длин волн спектра. Так как для данного материала Δ зависит только от разности главных напряжений, то все точки модели, имеющие одинаковую раз-

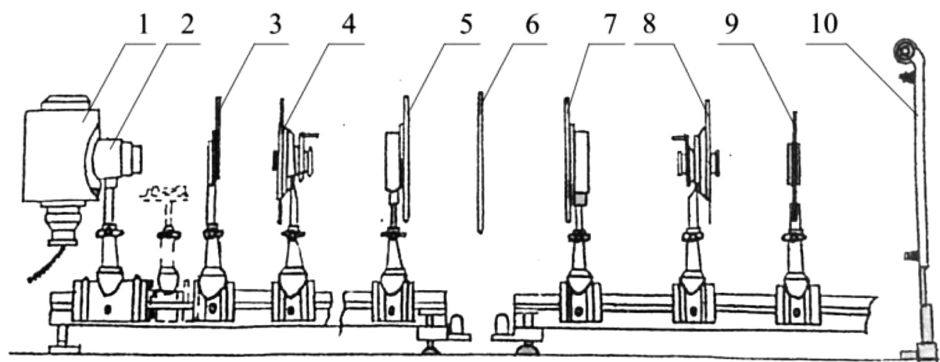


Рис. 5. Схема установки ППУ-7:

1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — светофильтр; 4 — поляризатор с пластинкой четверть волны; 5 — рабочая линза; 6 — исследуемая модель; 7 — ответная рабочая линза; 8 — анализатор с пластинкой четверть волны; 9 — проекционный объектив; 10 — экран

Fig. 5. Scheme of the ППУ-7 installation:

1 — light source; 2 — condenser; 3 — light filter; 4 — polarizer with a quarter-wave plate; 5 — working lens; 6 — model under study; 7 — response working lens; 8 — analyzer with a quarter-wave plate; 9 — projection lens; 10 — screen

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

ность главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$), будут окрашены в один и тот же цвет спектра.

Геометрическое место точек с одинаковым цветом (одинаковой разностью напряжений) образует полосы, называемые изохромами. Разность хода Δ связана с длиной волны света λ соотношением:

$$\Delta = k \cdot \lambda, \quad (2)$$

где k — порядок полосы в данной точке модели (целое или дробное число 0, 1, 2, ...); λ — длина волны используемого света (для белого света принимается длина волны «тяжести» спектра, обычно ≈ 550 нм).

Используя зависимость (1) и (2), получаем формулу метода для определения напряжений по порядку полосы:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\Delta}{h \cdot C} = \frac{k \cdot \lambda}{h \cdot C} = \frac{k \cdot \sigma_0}{h}, \quad (3)$$

где σ_0 — оптическая постоянная материала, Н/м.

При этом коэффициент оптической активности C , имеет зависимость:

$$C = \frac{\lambda}{\sigma_0} \quad (4)$$

Тарировка материала

(определение оптической постоянной материала)

Для определения оптико-механических характеристик материала модели (эпоксидная смола ЭД-20) были проведены тарировочные эксперименты на образцах-свидетелях. Целью тарировки является определение оптической постоянной материала по напряжению (σ_0), которая связывает порядок интерференционной полосы с величиной действующих напряжений.

Тарировка эпоксидной смолы проводилась путем ступенчатого нагружения двух независимых образцов-свидетелей — сжатие диска по диаметру и чистый изгиб прямоугольной балки. На основе полученной линейной зависимости между прикладываемой нагрузкой и порядком возникающих интерференционных полос была вычислена усредненная оптическая постоянная материала, которая составила 13,1 Н/мм.

Данная величина используется для пересчета порядков полос в значения главных напряжений на исследуемых моделях резьбового и шпоночного соединений [10].

Технология изготовления фотоупругих моделей

Для обеспечения высокой геометрической точности и повторяемости эксперимента была применена технология литья в эластичные силиконовые формы по мастер-моделям, изготовленным методом 3D-печати на FDM-принтере.

В напечатанные мастер-модели заливался жидкий двухкомпонентный силикон 100А:2В с предварительной обработкой разделительной силиконовой смазкой-спреем.

В качестве материала моделей использовалась эпоксидная смола ЭД-20. Для придания материалу необходимых оптико-механических свойств и снижения хрупкости были применены следующие компоненты для создания смеси: основа А (смола ЭД-20), отвердитель В (ТЕТА), пластификатор (ДБФ). Подготовленная смесь заливалась в полученные силиконовые формы. Время полной полимеризации эпоксидной смолы составило одни сутки.

Дополнительно на FDM-принтере были напечатаны жесткие элементы нагружения (ограничители), имитирующие ответные детали и передающие нагрузку на модель, которые фиксируют перемещения в поперечном направлении.

Проведение эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на установке ППУ-7. Модель закреплялась в тисках нагрузочного устройства. Для ограничения перемещения в поперечных направлениях использовалась напечатанная на 3D-принтере рамка (рис. 6а).

Повторяемость результатов предложенной методики подтверждается пробным экспериментом, интерференционная картина которого полностью совпала с результатами основных тестов.

Оценка достоверности полученных данных проводилась с учетом суммарной погрешности, которая оценивается в пределах 5–6 %, включая инструментальную, методическую и технологическую погрешности.

Проводилось ступенчатое нагружение моделей. Исследуемые модели доводились до полного разрушения для определения предельных характеристик материала и характера разрушения (рис. 6б).

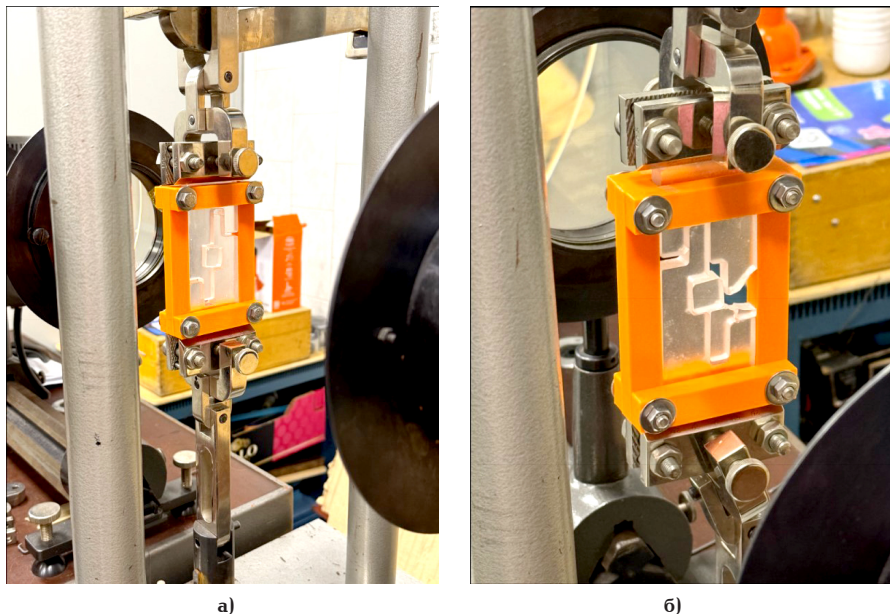


Рис. 6. Установка исследуемой модели:
а) — исследуемая экспериментальная модель;
б) — исследуемая модель после эксперимента

Fig. 6. Installation of the research model:
а) — research experimental model; б) — research model after the experiment
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

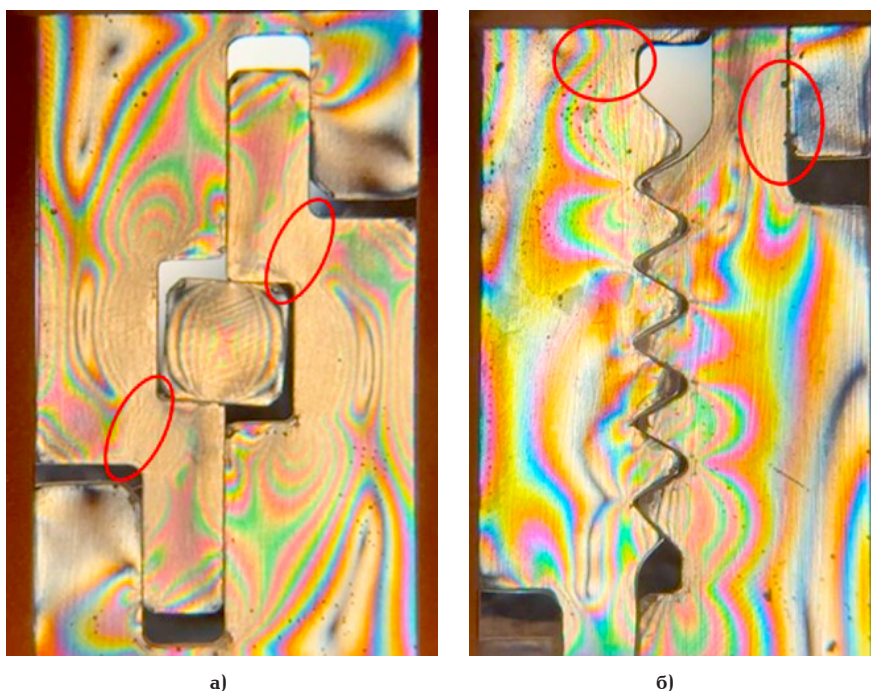


Рис. 7. Критические места напряжений:

а) — шпоночное соединение; б) — резьбовое соединение

Fig. 7. Critical stress locations: а) — keyway connection; б) — threaded connection
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

В ходе эксперимента с резьбовым соединением фиксировалось распределение нагрузки по виткам резьбы.

Сразу после снятия пиковой нагрузки в материале наблюдался эффект остаточных напряжений. На полученных снимках отчетливо визуализируется градиент распределения нагрузки: максимальная концентрация полос (изохром) наблюдается в первых нагруженных витках резьбы, что соответствует теории распределения сил в винтовых парах. Критическим концентратором напряжений в резь-

бовых соединениях являются проточки и канавки для выхода резца. На эксперименте в этих местах произошло разрушение моделей.

Нагрузка прикладывалась с помощью грузиков до разрушения. При этом установка нагружения имеет рычаг, плечо которого учитывается в пересчете на усилие. Итоговая передаваемая нагрузка на рассматриваемый объект исследования определялась по формуле:

$$N = m_{\text{гр}} \cdot l_{\text{плечо}} \cdot g = m_{\text{гр}} \cdot 50 \cdot 10 \text{ [H]},$$

где $m_{\text{гр}}$ — масса прикладываемого груза к рычажному элементу установки, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; $I_{\text{плечо}}$ — отношение плеч рычага.

Анализ полученной картины напряжений на установке

Геометрия модели имитировала передачу крутящего момента (в плоской постановке — сдвигающего усилия) от одной части корпуса к другой через промежуточный элемент — шпонку / резьбу. Нагрузка прикладывалась ступенчатая. Полученная интерференционная картина позволила выявить характерные зоны напряженно-деформированного состояния, свойственные шпоночным / резьбовым соединениям.

В углах шпоночного паза зафиксирована максимальная концентрация напряжений. Это говорит о том, что углы пазов являются наиболее уязвимыми местами, что подтверждается на эксперименте — место разрушения конструкции. В резьбовом соединении концентраторы напряжений — проточки и канавки для выхода резца, сопровождающиеся разрушением.

Таким образом, при проектировании шип-паза необходимо брать повышенный запас прочности в местах перехода от углов шпоночного паза и конфигурацией выбранного шип-паза в обоих соединениях (рис. 7).

Получение картины фотоупругости численным методом

Стандартные результаты ANSYS (Equivalent Stress) показывают абсолютные значения напряжений. Для прямой валидации результатов конечно-элементного моделирования с данными эксперимента была применена методика виртуальной фотоупругости. Суть методики заключается в математическом получении интерференционной картины полос на основе полей напряжений, рассчитанных в программном комплексе ANSYS.

Основой метода является закон Вертгейма (1), связывающий механическое напряженное состояние с оптическим изменением свойства материала — в плоской задаче (Plane Stress), когда свет проходит перпендикулярно плоскости модели толщины h , возникает оптическая разность хода Δ .

Свет представляет собой электромагнитную волну. Разность хода Δ , м, соответствует фазовому сдвигу или разности фаз $\Delta\varphi$, радианы, колебаний световых векторов:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta, \quad (5)$$

где λ — длина волны источника света.

Подставим (1) в (5), чтобы выразить разность фаз через напряжения:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot C \cdot h}{\lambda} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3). \quad (6)$$

В эксперименте использовалась схема кругового полярископа (с пластинками $\lambda/4$) в режиме темного поля. В такой оптической схеме интенсивность света I на выходе из анализатора определяется классическим уравнением интерференции двух лучей (закон Малюса) [3, 11–15]:

$$I = I_{\text{max}} \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right), \quad (7)$$

где I — наблюдаемая интенсивность (яркость точки на экране); I_{max} — интенсивность входящего источника света; $\Delta\varphi$ — полный фазовый сдвиг между лучами.

Для реализации в ANSYS необходимо объединить уравнения механики (6) и оптики (7). Подставим выражение фазового сдвига $\Delta\varphi$ (6) в уравнение интенсивности света (7):

$$I = I_{\text{max}} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot C \cdot h}{\lambda} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)\right). \quad (8)$$

В уравнении (8) присутствует группа констант $\left(\frac{\pi \cdot C \cdot h}{\lambda}\right)$, зависящих от свойств материала (C), геометрии (h) и источника света (λ). Объединим в единый коэффициент K :

$$K = \frac{\pi \cdot C \cdot h}{\lambda}. \quad (9)$$

Используя зависимость (4) для полосы материала, которая получается из решения системы уравнений (1) и (3), коэффициент K можно выразить как

$$K = \frac{\pi \cdot h}{\sigma_0}. \quad (10)$$

На основе полученного уравнения (8) и введенного коэффициента (9, 10) в постпроцессоре ANSYS был выведен «пользовательский результат» (User Defined Result).

Синтаксис выражения в ANSYS:

$$\sin(K \cdot (S1 - S3))^2,$$

где $S1$, $S3$ — узловые усредненные значения (Nodal Averaged), соответствующие главным напряжениям (σ_1 и σ_3); K — константа, определяемая в ходе экспериментальной тарировки материала на образцах:

$$K = \frac{\pi \cdot h}{\sigma_0} = \frac{\pi \cdot 10}{13,1} = 2,4 \frac{1}{\text{МПа}}.$$

Таким образом, распределение полей Result в ANSYS визуально полностью имитирует картину изохром (интерференционных полос), получаемую при просвечивании модели монохроматическим светом. Это позволяет производить прямое визуальное сравнение расчетной картины на фотографию эксперимента.

Результаты виртуального эксперимента в ANSYS

Для рассмотрения и сопоставления результатов полей напряжений в разъемных соединениях сравниваются две идентичные постановки в численной модели и на эксперименте при осевой растягивающей нагрузке $F = 500$ Н. Для наглядности визуальные картины, выявления локальных концентраторов и цветовая шкала были адаптированы [13].

Резьбовое соединение

На рис. 8 приведено сравнение картин интерференционных полос (изохром), полученных численно и на экспериментальной установке ППУ-7 в поляризованном свете. Количественная оценка (разность главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$)) проводилась в зоне локального концентратора — во впадине первого, наиболее нагруженного витка резьбы, где наблюдается конечное число полос.

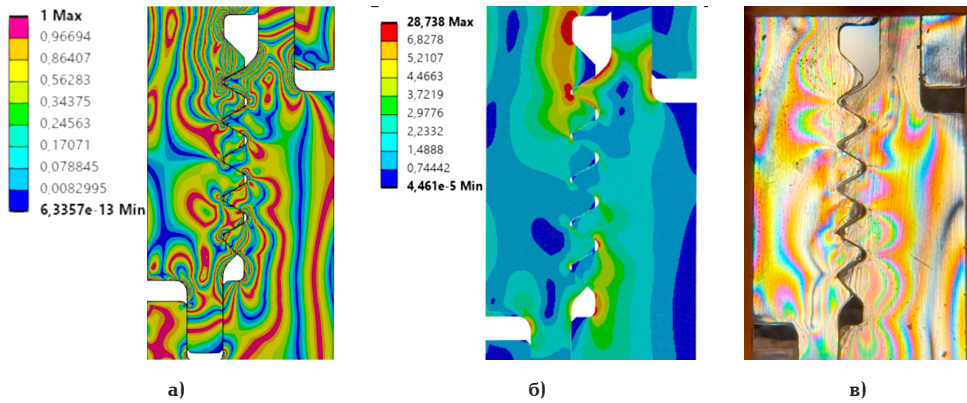


Рис. 8. Картина интерференционных полос:

а) — интерференционная картина с использованием пользовательской функции;
б) — интенсивность напряжений, МПа; в) — эксперимент

Fig. 8. Interference band pattern:

а) — interference pattern using a user function; б) — stress intensity, MPa; в) — experiment

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

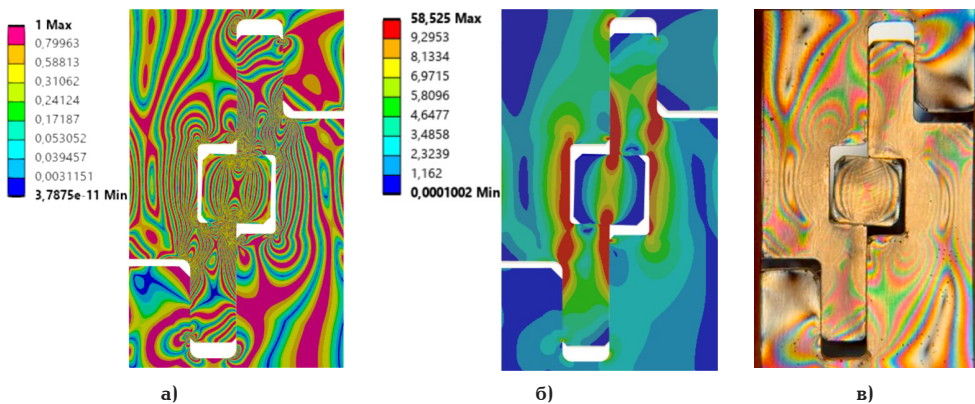


Рис. 9. Картина интерференционных полос:

а) — интерференционная картина с использованием пользовательской функции;
б) — интенсивность напряжений, МПа; в) — эксперимент

Fig. 9. Interference band pattern:

а) — interference pattern using a user function; б) — stress intensity, MPa; в) — experiment

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Максимальный порядок полосы в данной зоне $k = 4$. С учетом оптической постоянной $\sigma_0 = 13,1$ Н/мм и толщины модели $h = 10$ мм, экспериментальная разность главных напряжений составила:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{эксп}} = \frac{k \cdot \sigma_0}{h} = \frac{4 \cdot 13,1}{10} = 5,24 \text{ МПа}.$$

В численной модели максимальная интенсивность напряжений во впадине составила $\sigma_{\text{ansys}} = 5,21$ МПа. Относительное расхождение между численным решением и результатами поляризационно-оптического эксперимента составило 0,57 %.

Таким образом, наблюдается схожесть между численным расчетом и экспериментом:

1. Геометрия полос в зонах концентрации (впадины резьбы) идентична.

2. Концентраторы напряжений в местах проточки и канавки для выхода резца и первых витков резьбы — критические места, сопровождающиеся разрушениями.

Шпоночное соединение

На рис. 9 произведено сопоставление интерференционных картин шпоночного соединения.

В зонах контакта визуализируются зоны передачи усилий на боковых гранях шпонки и ответных

поверхностях пазов (напряжения смятия). Максимальные напряжения локализованы в углах шпоночных пазов, которые являются наиболее опасными зонами для разрушения.

Для количественной оценки результатов конечно-элементного анализа производилось сопоставление интенсивности напряжений в геометрическом центре шпоночного элемента. Максимальный порядок полосы в данной зоне $k = 6$. Отсчет полос производился от изотропной точки нулевого порядка (ненагруженного угла шпонки) к ее геометрическому центру. Экспериментальная интенсивность напряжений в центре шпонки составила:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{эксп}} = \frac{k \cdot \sigma_0}{h} = \frac{6 \cdot 13,1}{10} = 7,86 \text{ МПа}.$$

В численной модели максимальная интенсивность напряжений в центре шпоночного элемента составила $\sigma_{\text{ansys}} = 8,13$ МПа. Относительное расхождение между численным решением и результатами поляризационно-оптического эксперимента составило 3,4 %.

Таким образом, сравнительный анализ картин продемонстрировал, что:

1. В геометрическом центре шпонки наблюдается характерная крестообразная область — зона

разгрузки. Количество полос и их конфигурация в численной модели соответствуют натурному образцу. Характер полос внутри шпонки корректно отображает сложное напряженное состояние сдвига.

2. В углах вырезов наблюдается высокий поря-док изохром, что свидетельствует о резком градиенте напряжений.

Заключение

Проведено численно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния ответственных разъемных узлов твердотопливных ракетных двигателей. Реализован комбинированный подход, объединяющий конечно-элементный анализ в ANSYS и метод фотоупругости с применением 3D-печати для изготовления высокоточных оптически чувствительных моделей.

Внедрение алгоритма постобработки «виртуальной фотоупругости» позволило провести прямое качественное и количественное сопоставление расчетных и натуральных интерференционных картин. В резьбовом соединении максимальные напряжения приходятся на первый рабочий виток и места проточек канавок под выход резца, в шпоночном — на углы пазов.

Количественная оценка по разности главных напряжений показала сходимость результатов: относительная погрешность составила 0,57 % для резьбового и 3,4 % — для шпоночного соединений. Точность результатов подтверждает адекватность расчетных моделей.

Незначительные расхождения обусловлены погрешностями изготовления 3D-печатных мастер-моделей и локальными краевыми эффектами при литье, а также отличием реальных свойств эпоксидной смолы конкретного замеса от паспортных данных. Рекомендуется изготавливать из той же партии полимера образец-свидетель для повышения точности и для определения его физико-механических характеристик на разрывной машине.

Список источников / References

1. Гузь А. Н., Макаренков А. Г., Чернышенко И. С. Прочность конструкций РДТТ: монография. Москва: Машиностроение, 1980. 244 с.

Guz' A. N., Makarenkov A. G., Chernyshenko I. S. Prochnost' konstruktsiy RDTT. Moscow, 1980. 244 p. (In Russ.).

2. Апакидзе Ю. В. Твердотопливные двигательные установки маршевых ступеней баллистических ракет. Москва: АО «Корпорация «Московский институт теплотехники», 2021. 137 с.

Apakidze Yu. V. Tverdotoplivnyye dvigatel'nyye ustanovki marshevykh stupeney ballisticheskikh raket. Moscow, 2021. 137 p. (In Russ.).

3. Герасимов С. И. Применение метода фотоупругости для анализа остаточных напряжений в компакт-дисках // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Т. 45, № 3 (265). С. 176 — 180. EDN: ONMBVD.

Gerasimov S. I. Photoelastic method for analyzing residual stresses in compact disks. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2004;45(3):176 — 180. EDN: ONMBVD. (In Russ.).

4. Фрохт М. М. Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений / пер. с англ. М. Ф. Бокштейн, Ю. Ф. Краснотовича, А. К. Прейсс. Т. 1. Москва, Ленинград: Гостехиздат, 1948. 432 с.

Frokht M. M. Fotouprugost'. Polyarizatsionno-opticheskiy metod issledovaniya napryazheniy / trans. from Engl. M. F. Bokshteyn, Yu. F. Krasontovich, A. K. Preyss. Moscow, Leningrad, 1948. 432 p. (In Russ.).

5. Huang Y., Yang X., Yan D. [et al.]. Digital Photoelasticity method used in the stress test. *2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*. Changchun, 2010. P. 156 — 159.

6. Yokoyama Yu., Mitchell B.-R., Nassiri A. [et al.]. Integrated photoelasticity in a soft material: phase retardation, azimuthal angle, and stress-optic coefficient. *Optics and Lasers in Engineering*. 2023;161:107335. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107335>.

7. Ramesh Kr., Sachin S. Digital photoelasticity: Recent developments and diverse applications. *Optics and Lasers in Engineering*. 2020;135:106186. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106186>.

8. Digendranath S., Jeby Ph., Annamala S. P. Assessment of a complex aerospace design through optical techniques. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;592-594:1006 — 1010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.1006>.

9. Raptis K. G., Savaidis A. A. Experimental investigation of spur gear strength using photoelasticity. *Procedia Structural Integrity*. 2018;10:33 — 40. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.006>.

10. Маршалкович А. С., Аскадский А. А. Получение оптически чувствительных полимерных материалов для моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций и сооружений методом фотоупругости // Вестник МГСУ. 2011. № 1-2. С. 167 — 178. EDN: OUVZJP.

Marshalkovich A. S., Askadskiy A. A. Getting optical sebsitivity of polymer materials for the simulation of stress-strain state structures and co-oruzheniyim photoelasticity method. *Vestnik MGSU*. 2011;1-2:167 — 178. EDN: OUVZJP. (In Russ.).

11. Magalhães P. A., Magalhães C. A., Magalhães A. L. Computational methods of phase shifting to stress measurement with photoelasticity using plane polariscope. *Optik*. 2017;130:213 — 226. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.11.037>.

12. Лихачев А. В., Табанохова М. В. Новый алгоритм обработки данных метода фотоупругости // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 79. С. 100 — 110. <https://doi.org/10.17223/19988621/79/9>. EDN: EKATRN.

Likhachev A. V., Tabanyukhova M. V. A new processing algorithm for photoelasticity method data. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2022;79:100 — 110. <https://doi.org/10.17223/19988621/79/9>. EDN: EKATRN. (In Russ.).

13. Pástor M., Hagara M., Kostka J. Stress Analysis Performed by Photoelasticity and Digital Image Correlation. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;816:474 — 481. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.816.474>.

14. Савостьянов В. Н., Фриштер Л. Ю. 100 лет: фотоупругость — ЛИИ-МИСИ — МГСУ // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, № 10. С. 1297 — 1323. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.10.1297-1323>. EDN: GACCWH.

Savost'yanov V. N., Frishter L. Yu. 100-years' story of success: Photoelasticity — LSR-MICE — MSUCE. *Vestnik MGSU*. 2021;16(10):1297 — 1323. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.10.1297-1323>. EDN: GACCWH. (In Russ.).

15. Riccio A., Acanfora V., Sellitto A. [et al.]. A comparative numerical-experimental investigation on the tensile behaviour of bonded, rivetted and hybrid composite joints configurations. *Composite Structures*. 2023;318(236):117114. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117114>

Вклад авторов:

К. В. Кривун. Постановка цели и задач исследования, проведение численной оценки прочности экспериментальных моделей, проведение качественной и количественной валидации, подготовка экспериментальных моделей.

А. А. Пещерова. Постановка цели и задач исследования, разработка комплексной экспериментально-численной методики, проведение эксперимента на установке, реализация алгоритма «виртуальной фотоупругости», корректировка текста.

А. А. Лазарева. Анализ состояния вопроса, подготовка экспериментальных образцов, подготовка базы данных материалов, консультирование по исследованию, формулирование выводов, подготовка текста статьи.

Authors' contribution:

Kirill V. Krivun. Formulating the research aim and objectives, conducting a numerical strength assessment of the experimental models, performing qualitative and quantitative validation, preparing the experimental models.

Anastasia A. Pescherova. Formulating the research aim and objectives, the development of an integrated experimental-numerical methodology, conducting of experiments on the test facility, the implementation of the "virtual photoelasticity" algorithm, the revision of the text.

Arina A. Lazareva. Analysing of the problem, preparing of the experimental specimens, the compilation of the material database, the research consultation, the formulation of conclusions, preparing the text of the text.

Информация об авторах:

КРИВУН Кирилл Владимирович, инженер АО ГНЦ «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша», г. Москва.

e-mail: krivun0200@mail.ru

ПЕЩЕРОВА Анастасия Алексеевна, инженер АО ГНЦ «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша», г. Москва.

e-mail: peshcherova.nastena@mail.ru

ЛАЗАРЕВА Арина Александровна, аспирант кафедры 203 Московского авиационного института (национального исследовательского университета), г. Москва.

e-mail: a.laz19@bk.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 07.04.2026; одобрена после рецензирования 30.04.2026; принята к публикации 22.06.2026.

Information about the authors:

KRIVUN Kirill Vladimirovich, Engineer, JSC SSC "Keldysh Research Center", Moscow.

e-mail: krivun0200@mail.ru

PESCHEROVA Anastasia Alekseevna, Engineer, JSC SSC "Keldysh Research Center", Moscow.

e-mail: peshcherova.nastena@mail.ru

LAZAREVA Arina Alexandrovna, Postgraduate of the 203 Department, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow.

e-mail: a.laz19@bk.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 07.04.2026; approved after reviewing 30.04.2026; accepted for publication 22.06.2026.