

УДК 621

doi:10.21685/2072-3059-2022-3-11

Оптимизация конструкции трубчатой направляющей из полимерного слоистого композиционного материала

Т. Н. Иванова¹, Е. Д. Карташова², А. Ю. Муйземнек³¹Удмуртский федеральный исследовательский центр

Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

¹Чайковский филиал ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Чайковский, Россия^{2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия¹rsg078829@mail.ru, ²katrina89@yandex.ru, ³muyzemnek@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Трубчатые направляющие находят широкое применение в изделиях общего и специального машиностроения. Существует острая необходимость в повышении их технических и эксплуатационных характеристик. Основными требованиями, предъявляемыми к трубчатым направляющим, являются высокие характеристики прочности, жесткости, надежности и малый вес. Появление новых высокопрочных синтетических волокон создает предпосылки для качественного скачка в совершенствовании таких конструкций. Методика проектирования трубчатых направляющих из полимерных слоистых композиционных материалов существенно отличается от методики проектирования стальных направляющих. Целью работы является создание методики оптимального проектирования трубчатых направляющих из полимерных слоистых композиционных материалов. *Материалы и методы.* В качестве исследуемых выбраны полимерные слоистые композиционные материалы, имеющие однонаправленные и тканые слои из углеродных волокон. При разработке методики использованы методы оптимального проектирования, механики деформируемого твердого тела, механики композитов. *Результаты.* Разработана методика оптимального проектирования трубчатых направляющих из полимерных слоистых композиционных материалов, включающая решение ряда частных задач. Содержание методики раскрывается на примере. *Выводы.* Методика оптимального проектирования трубчатых направляющих из полимерных слоистых композиционных материалов существенно отличается от методики проектирования стальных направляющих количеством, последовательностью и содержанием частных решаемых задач. Основными задачами, входящими в состав методики проектирования, являются анализ чувствительности, многокритериальная оптимизация, оценка робастности, анализ надежности.

Ключевые слова: трубчатая направляющая, полимерные слоистые композиционные материалы, тканый слой, однонаправленный слой, прочность, жесткость, надежность, математические модели материалов, напряженно-деформированное состояние, оптимизация

Для цитирования: Иванова Т. Н., Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Оптимизация конструкции трубчатой направляющей из полимерного слоистого композиционного материала // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 3. С. 109–128. doi:10.21685/2072-3059-2022-3-11

Optimizing the design of the tubular guide of polymeric layered composite material

© Иванова Т. Н., Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

T.N. Ivanova¹, E.D. Kartashova², A.Yu. Muyzemnek³

¹Udmurt Federal Research Center, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

¹Tchaikovsky branch of Perm State Polytechnic University, Tchaikovsky, Russia

^{2,3}Penza State University, Penza, Russia

¹rsg078829@mail.ru, ²katrina89@yandex.ru, ³muyzemnek@yandex.ru

Abstract. *Background.* Tubular guides are widely used in products of general and special engineering. There is an urgent need to improve their technical and operational characteristics. The main requirements for tubular guides are high strength, rigidity, reliability and low weight. The emergence of new high-strength synthetic fibers creates the prerequisites for a qualitative leap in the improvement of such structures. The technique for designing tubular guides made of polymeric layered composite materials differs significantly from the technique for designing steel guides. The purpose of the work is to develop a methodology for the optimal design of tubular guides made of polymeric layered composite materials. *Materials and methods.* Polymer layered composite materials with unidirectional and woven layers of carbon fibers were chosen as the investigated materials. When developing the technique, methods of optimal design, methods of mechanics of a deformable solid body, methods of mechanics of composites were used. *Results.* A technique has been developed for the optimal design of tubular guides made of polymeric layered composite materials, including the solution of a number of particular problems. The content of the methodology is revealed by an example. *Conclusions.* The method of optimal design of tubular guides made of polymeric layered composite materials differs significantly from the method of designing steel guides in the number, sequence, and content of particular tasks to be solved. The main tasks that are part of the design methodology are sensitivity analysis, multi-criteria optimization, robustness assessment, and reliability analysis.

Keywords: tubular guide, polymer layered composite materials, woven layer, unidirectional layer, strength, rigidity, reliability, mathematical models of materials, stress-strain state, optimization

For citation: Ivanova T.N., Kartashova E.D., Muyzemnek A.Yu. Optimizing the design of the tubular guide of polymeric layered composite material. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(3):109–128. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-3-11

Введение

Трубчатые направляющие находят широкое применение в изделиях общего и специального машиностроения. Существует острая необходимость в повышении их технических и эксплуатационных характеристик. Основными требованиями, предъявляемыми к трубчатым направляющим, являются высокие характеристики прочности, жесткости, надежности и малый вес. Появление новых высокопрочных синтетических волокон создает предпосылки для качественного скачка в совершенствовании таких конструкций. Методика проектирования трубчатых направляющих из полимерных слоистых композиционных материалов (ПСКМ) существенно отличается от методики проектирования стальных направляющих количеством, последовательностью и содержанием частных решаемых задач. Компьютерное моделирование процессов функционирования позволяет сократить продолжительность проектирования и улучшить технические и эксплуатационные характеристики трубчатых направляющих. Целью исследования является разработка методики оптимального проектирования трубчатых направляющих из полимерных

слоистых композиционных материалов. Основными задачами, решаемыми в рамках методики оптимального проектирования трубчатых направляющих из ПСКМ, являются анализ чувствительности, многокритериальная оптимизация, оценка робастности и анализ надежности.

Проектирование трубчатых направляющих предполагает установление зависимостей между их эксплуатационными и техническими характеристиками, с одной стороны, и техническими параметрами, характеристиками механических свойств и условиями эксплуатации – с другой. Основой для установления этих связей могут являться компьютерные модели. Вопросы компьютерного моделирования подобных изделий рассмотрены в работах [1–4].

Создание компьютерных моделей изделий из ПСКМ требует изучения влияния структуры материалов на их сопротивление деформированию и разрушению. Механическое поведение ПСКМ отличается анизотропией механических свойств и сложностью процессов деформирования и разрушения. Для адекватного описания процессов сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ необходимо учитывать геометрические и физико-механические характеристики входящих в состав ПСКМ тканых и однонаправленных слоев. При изучении механического поведения ПСКМ представляется оправданным использование теоретико-экспериментального подхода, основанного на математических моделях материалов, образующих иерархическую структуру. Вопросы создания моделей композиционных материалов рассмотрены в работах [5–7].

Одним из факторов, который необходимо учитывать при проектировании трубчатых направляющих, является технология изготовления ПСКМ. Именно физико-механические характеристики компонентов и технология изготовления определяют характеристики механических свойств ПСКМ и величину их разброса. Величина разброса характеристик механических свойств определяется уровнем дефектности ПСКМ. Вопросом создания моделей композиционных материалов посвящены работы [8–11]. В них экспериментально определены характеристики сопротивления деформированию и разрушению достаточно широкой номенклатуры ПСКМ, полученных по технологиям ручного формования, вакуумного мешка и вакуумной инфузии, а также установлены статистические зависимости между характеристиками сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ и характеристиками их технологических дефектов.

1. Конструкция трубчатой направляющей

Трубчатая направляющая состоит из трубы 1 и двух диафрагм 2 и 3 (рис. 1). Труба имеет винтовой паз 4. Внутренний диаметр трубы – 155 мм, длина – 1250 мм, толщина стенки – 3 мм. Винтовой паз наклонен к образующей трубы под углом $2,5^\circ$. Ширина паза составляет 30 мм, глубина – 15 мм, толщина – 4,5 мм. Диафрагмы имеют размер 200×200 мм. Диафрагмы закреплены на податливом основании. Жесткость основания в поперечных направлениях равна 0,4 МН/м, в осевом – 0,8 МН/м. Угол наклона трубчатой направляющей равен 12° . Прототип трубчатой направляющей изготовлен из конструкционной легированной высококачественной стали и имеет массу 17,1 кг.

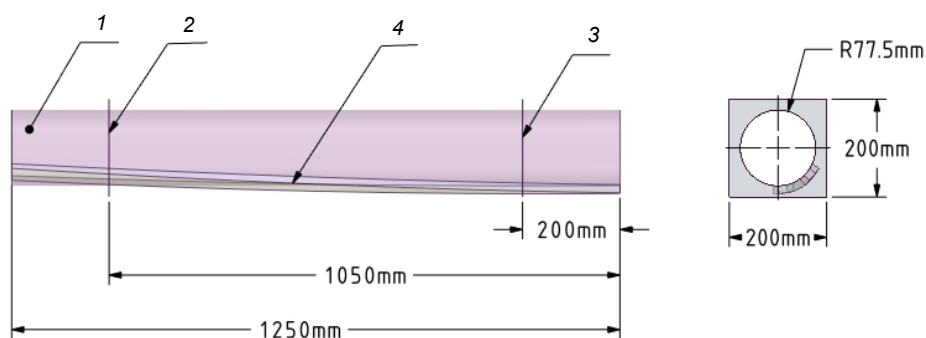


Рис. 1. Конструкция трубчатой направляющей: 1 – труба; 2, 3 – диафрагмы; 4 – паз

На трубчатую направляющую действуют внутреннее давление 0,16 МПа, давление на боковую поверхность паза 1,7 МПа, собственный вес и вес размещенного в направляющей груза.

Разрабатываемая трубчатая направляющая имеет трубу, включающую паз, из полимерных слоистых композиционных материалов. Первый вариант конструкции состоит из трех полимерных композиционных материалов:

- первый материал состоит из углеродной ткани, являющейся армирующим, и эпоксидной смолы, являющейся связующим;
- второй материал состоит из однонаправленных углеродных нитей, являющихся армирующим, и эпоксидной смолы, являющейся связующим;
- третий материал отличается от первого большим содержанием армирующего, что обеспечивает ему более высокие характеристики упругости и прочности.

Из этих материалов образованы тканые и однонаправленные слои, имеющие одинаковую толщину, равную 0,25 мм, и различную ориентацию.

Из этих слоев собираются пакеты:

- первый пакет слоев состоит из шести тканых слоев, имеющих ориентацию $(-30/30/0/0/30/-30)^\circ$;
- второй пакет состоит из шести однонаправленных слоев, имеющих ориентацию $(0/0/0/0/0/0)^\circ$;
- третий пакет состоит из шести тканых слоев из полимерного композита высокой прочности (третий материал), имеющих ориентацию $(-30/30/0/0/30/-30)^\circ$.

Толщина каждого пакета слоев равняется 1,5 мм.

Полярные диаграммы упругих модулей первого и второго пакетов показаны на рис. 2. Первый пакет слоев собран таким образом, что его упругие модули не зависят от ориентации, т.е. пакет является изотропным в плоскости. Второй пакет слоев имеет явно выраженные анизотропные свойства. Полярные диаграммы третьего пакета слоев, в общем, похожи на диаграммы первого. Они являются изотропными в плоскости, различия заключаются в максимальных значениях упругих моделей.

Из пакетов собраны субламинаты:

- первый субламинат, из которого изготовлена собственно труба, состоит из двух пакетов слоев – первого и второго;
- второй субламинат, из которого изготовлен паз, состоит из всех трех пакетов слоев.

Инженерные константы каждого субламината приведены в табл. 1.

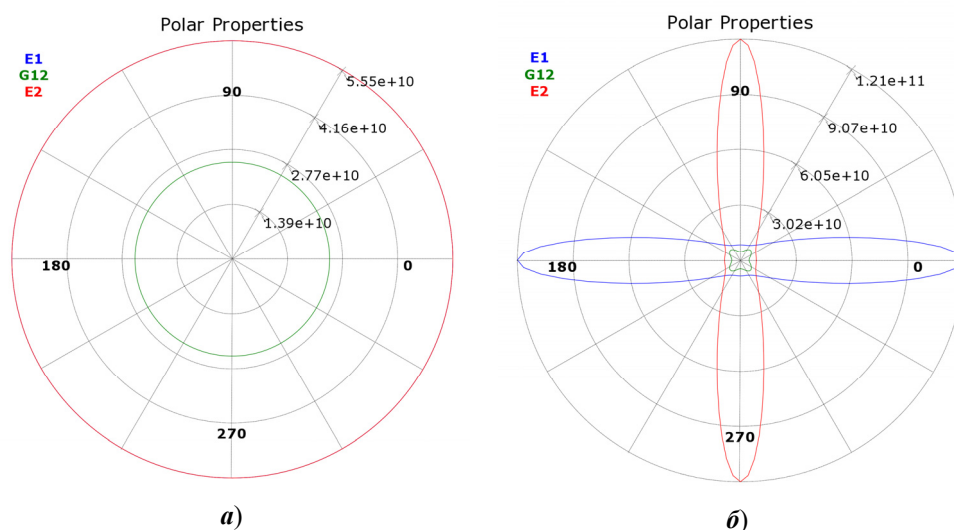


Рис. 2. Полярные диаграммы упругих моделей:
 а – первого пакета слоев; б – второго пакета слоев

Таблица 1

Инженерные константы субламинатов

Инженерная константа	Субламинат	
	первый	второй
Модуль упругости при кручении, ГПа	14,778	27,417
Модуль продольной упругости при изгибе E_1 , ГПа	87,741	67,619
Модуль продольной упругости при изгибе E_2 , ГПа	31,808	63,567
Модуль сдвига в плоскости ламината G_{12} , ГПа	14,597	20,269
Модуль продольной упругости E_1 , ГПа	88,3	84,389
Модуль продольной упругости E_2 , ГПа	32,275	47,434
Модуль сдвига вне плоскости ламината G_{23} , ГПа	2,179	2,489
Модуль сдвига вне плоскости ламината G_{31} , ГПа	2,97	3,039
Поправочный коэффициент внеплоскостного сдвига k_{44}	0,751	0,848
Поправочный коэффициент внеплоскостного сдвига k_{55}	0,803	0,876

Целью проектирования является создание легкой, прочной и надежной конструкции трубчатой направляющей. Цели проектирования достигаются за счет изменения структуры субламинатов, в том числе изменения числа слоев и материала каждого слоя, а также направления укладки каждого слоя из однонаправленных нитей.

Оптимальное проектирование предполагает последовательное решение ряда задач, в которых определены целевые функции (критерии проектирования), ограничения, заданные в виде равенств и неравенств, а также параметры проектирования (оптимизации).

В представленных далее задачах критериями проектирования являются:

- максимальное значение обратного коэффициента запаса прочности [12];
- масса конструкции.

Параметрами проектирования являются:

- число слоев и материал каждого слоя в субламинате;
- направления укладки слоев из однонаправленных нитей.

Определение напряженно-деформированного состояния трубчатой направляющей осуществляется методом конечных элементов. Используемая в расчетах конечно-элементная сетка и некоторые результаты расчета напряженно-деформированного состояния исходной конструкции трубчатой направляющей при номинальных нагрузках приведены на рис. 3.

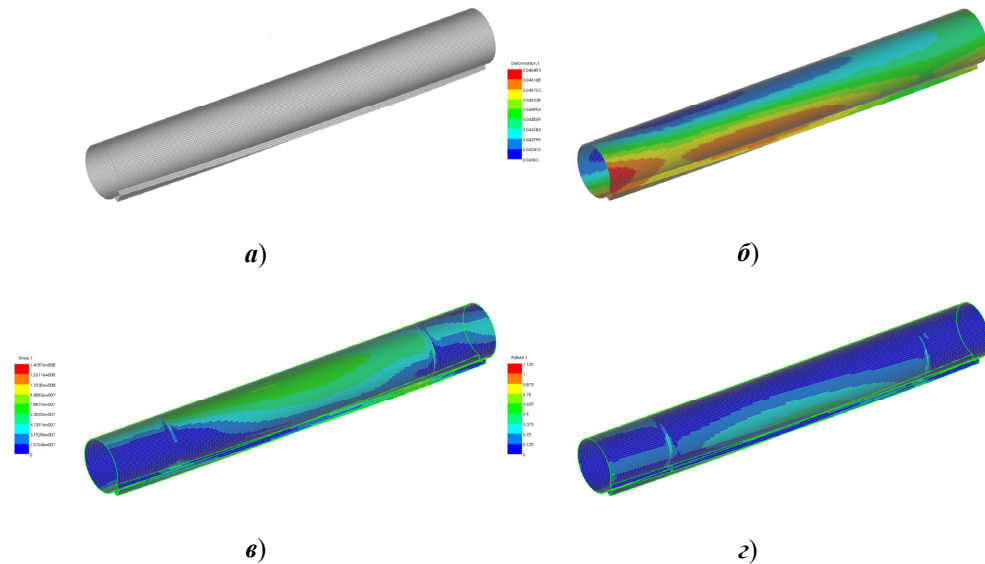


Рис. 3. Конечно-элементная сетка (а), распределение модуля вектора перемещений (б), распределение первого главного напряжения в первом слое трубы (в); распределение обратного коэффициента запаса прочности

Представленные результаты свидетельствуют о следующем:

- максимальное значение обратного коэффициента запаса прочности равно 0,693;
- масса конструкции равна 3,176 кг.

Описание структуры ПСКМ, из которого изготовлена трубчатая направляющая, приведено выше.

2. Анализ чувствительности

Анализ чувствительности предполагает оценку влияния параметров проектирования на критерии проектирования. Рассмотрим влияние условий нагружения на максимальное значение обратного коэффициента запаса прочности, т.е. в качестве критерия проектирования выберем максимальное значение обратного коэффициента запаса прочности, в качестве параметров – внутреннее давление, давление на боковую поверхность паза и вес направляющей и груза.

С помощью анализа чувствительности определим параметры, которые в наибольшей степени влияют на критерии проектирования. Это позволит в дальнейшем исключить из рассмотрения параметры проектирования, которые влияют на критерии проектирования незначительно, и, следовательно, выполнить оптимизацию эффективно.

Для выполнения анализа чувствительности использован метод, основанный на построении метамодели оптимального прогноза [13]. Полученная в результате анализа поверхность оптимального прогноза показана на рис. 4.

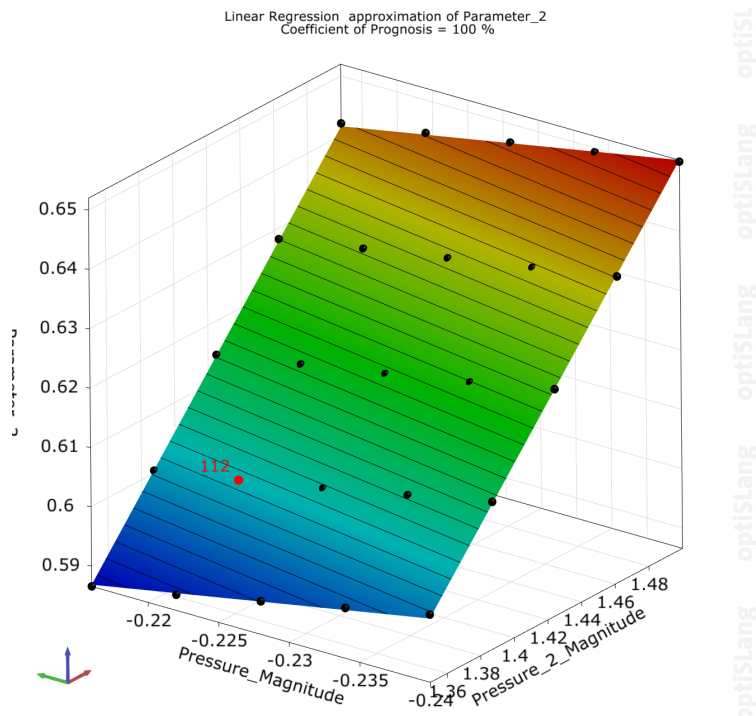


Рис. 4. Поверхность оптимального прогноза

Коэффициенты прогноза [13] для исследуемых параметров составили (рис. 5):

- внутреннее давление – 96,5 %;
- давление на боковую поверхность паза – 3,1 %;
- вес направляющей и груза – менее 1 %.

Коэффициент прогноза по всем параметрам составил 100 %.

Коэффициенты важности [13] для исследуемых параметров составили (рис. 6):

- внутреннее давление – 96 %;
- давление на боковую поверхность паза – 4 %;
- вес направляющей и груза оказался неважным фактором.

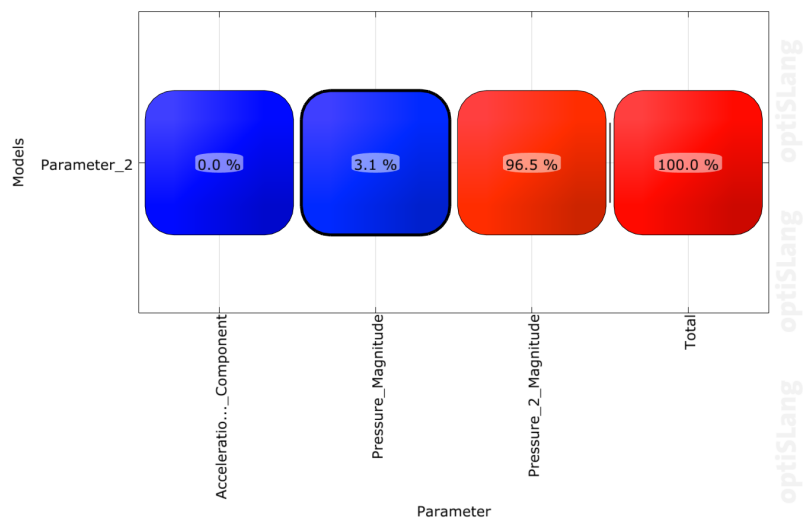
Анализ значений коэффициентов важности позволил исключить из дальнейшего рассмотрения такой фактор, как вес направляющей и груза. Угол наклона направляющей также был исключен из дальнейшего рассмотрения.

3. Многокритериальная оптимизация

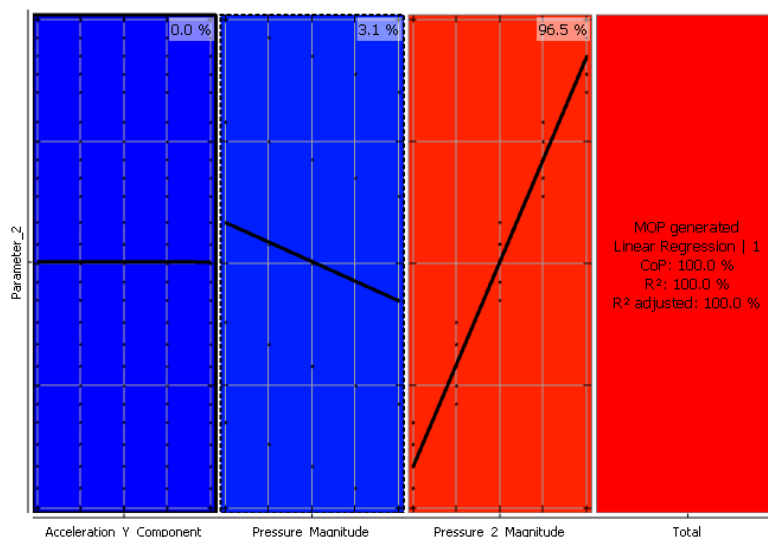
Первая оптимизационная задача:

- целевая функция – максимальное значение обратного коэффициента запаса прочности;
- ограничения – нет;

– параметры проектирования – угол укладки слоев из однонаправленных нитей.



а)



б)

Рис. 5. Коэффициенты прогноза (а); улучшенные коэффициенты прогноза (б)

Нижняя граница интервала угла укладки слоев из однонаправленных нитей составляла минус 45° , верхняя 45° .

Решение задачи осуществлялось методом оптимизации по адаптивной поверхности прогноза (ARSM) [13].

Результаты решения оптимизационной задачи следующие:

– оптимальное значение параметра проектирования (угла укладки слоев из однонаправленных нитей) составляет минус $2,51^\circ$ (рис. 7,б), при этом значение целевой функции составляет 0,67;

– коэффициент прогноза для используемой адаптивной поверхности прогноза составил 99 % (рис. 7,*а*), поиск оптимума потребовал 77 вычислений целевой функции (рис. 7,*б*).

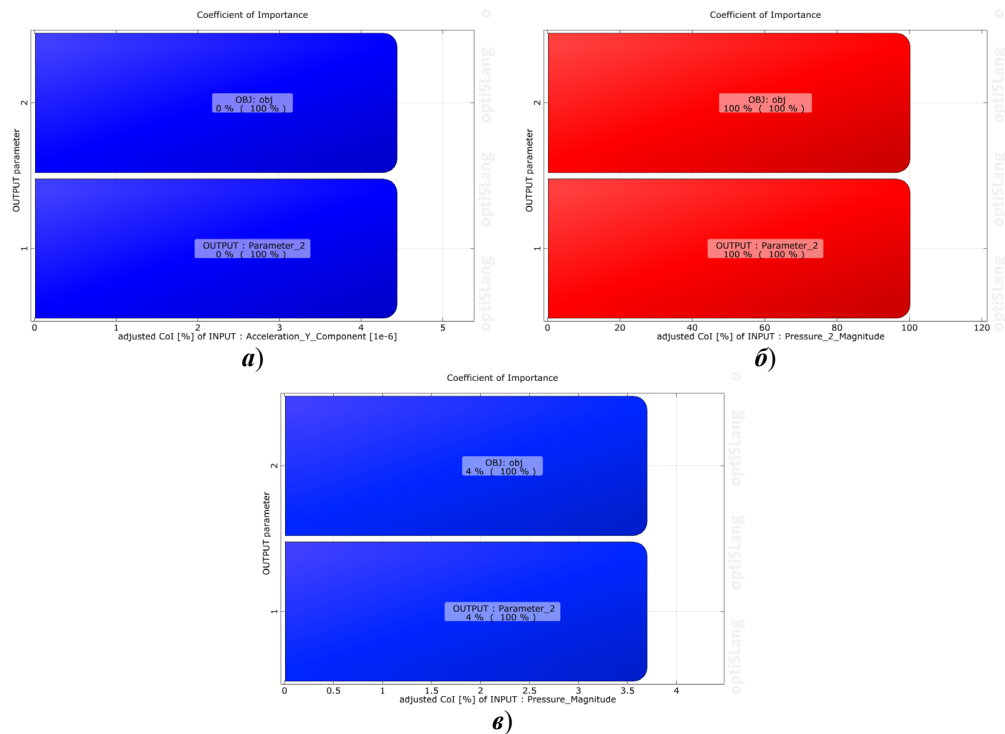


Рис. 6. Коэффициенты важности: *а* – веса направляющей и груза; *б* – внутреннего давления; *в* – давление на боковую поверхность паза

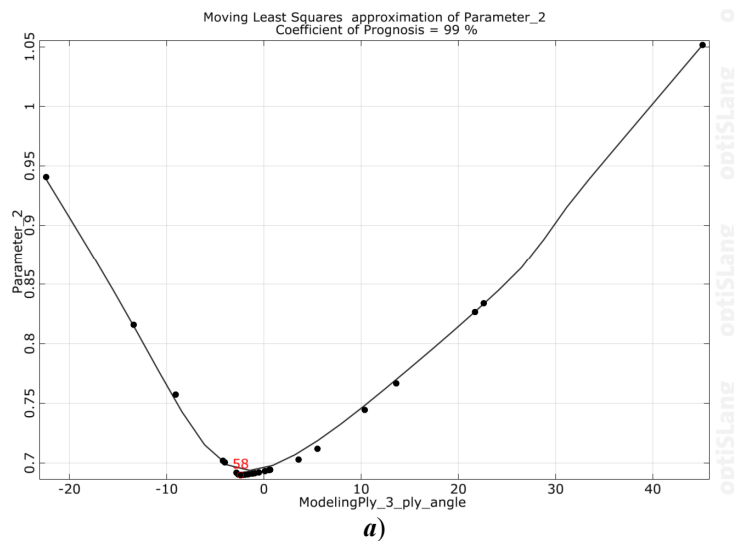


Рис. 7. Результаты решения первой оптимизационной задачи: *а* – 2D-поверхность оптимального прогноза; *б* – история изменения целевой функции; *в* – оптимальное значение параметра проектирования; *г* – оптимальное значение целевой функции

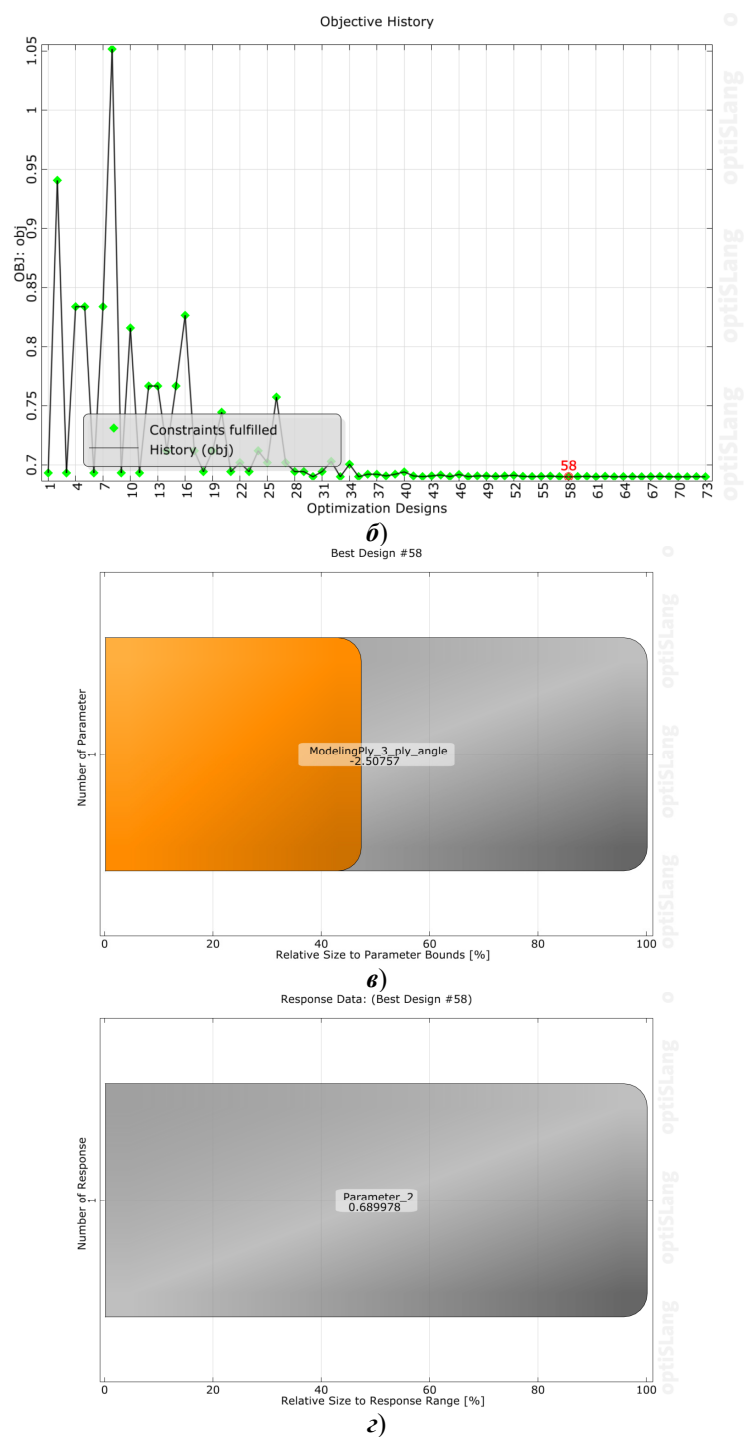


Рис. 7. Окончание

Вторая оптимизационная задача:

- целевая функция – масса направляющей;
- ограничения – максимальное значение обратного коэффициента запаса прочности (не должно превышать единицу);

– параметры проектирования – число слоев и материал каждого слоя в первом субламинате.

Число слоев в первом субламинате может меняться от 8 до 12.

Материал каждого слоя может быть выбран из тех трех материалов, описание которых приведено в первом разделе.

При решении задачи использовался генетический алгоритм (GS) [13].

Результаты решения оптимизационной задачи следующие:

– оптимальная последовательность размещения слоев в субламинате предполагает сокращение количества слоев с 12 до 11, а также замену материала внешних трех слоев со второго на первый (однонаправленного на тканый) материал;

– изменение структуры субламината приводит к снижению массы направляющей до 2,931 кг (масса исходной конструкции составляла 3,176 кг), при этом значение целевой функции составит 0,643.

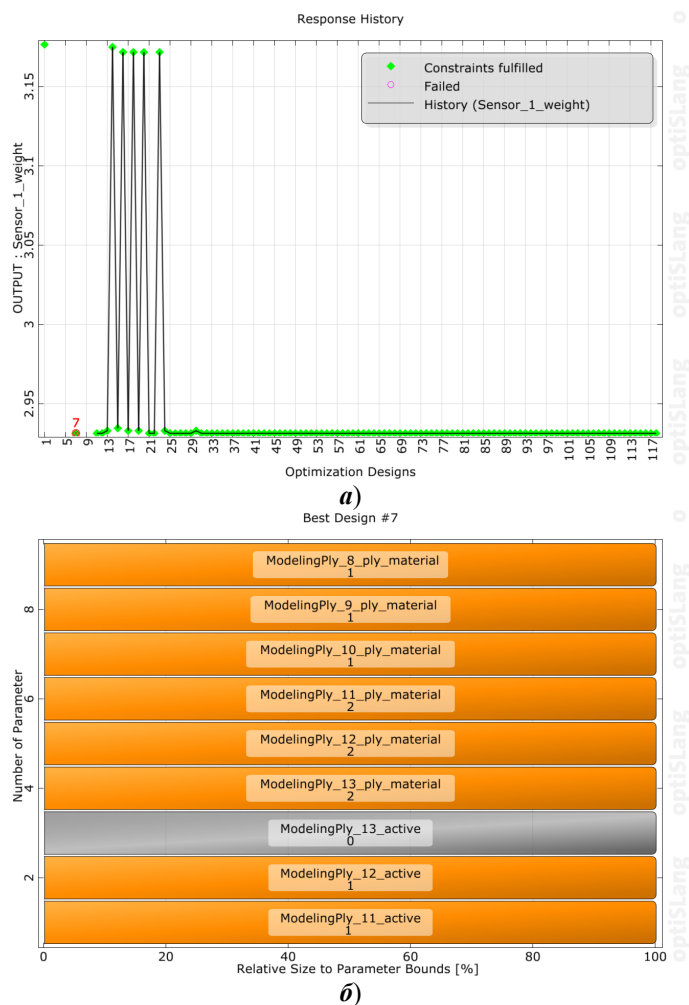


Рис. 8. Результаты решения второй оптимизационной задачи: **a** – история изменения целевой функции; **b** – оптимальная структура первого субламината; **в** – оптимальное значение массы направляющей и обратного коэффициента запаса прочности; **г** – запас по ограничению и значение целевой функции

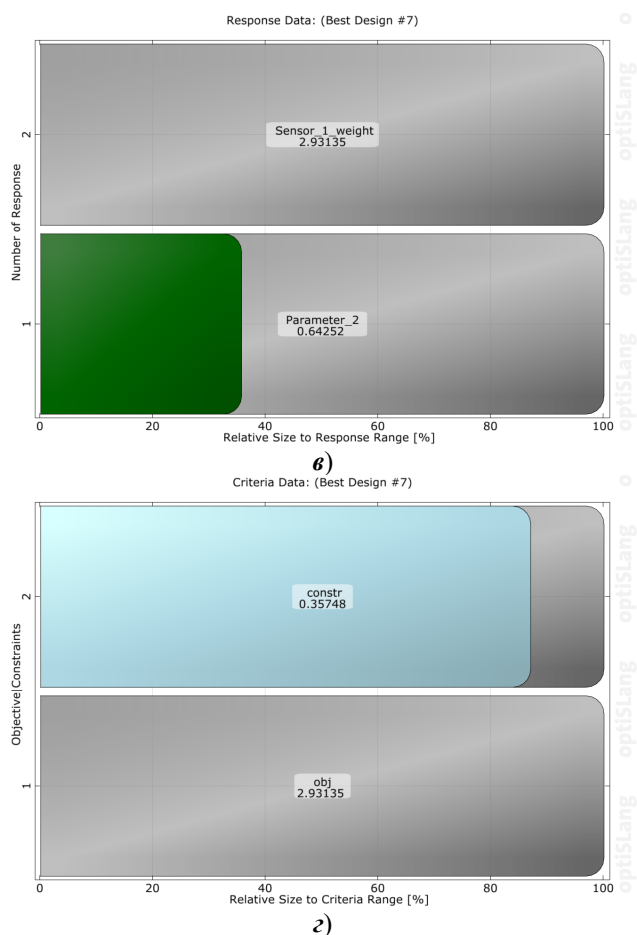


Рис. 8. Окончание

4. Оценка робастности

Робастность [13] – это свойство изделия, заключающееся в минимальной чувствительности выходных характеристик изделия к разбросу факторов, определяющих его состояния.

Вероятностный анализ робастности [13] выполняется с целью оценки влияния случайного изменения входных величин на разброс выходных параметров, определения чувствительности изменяющихся входных параметров, оценки доверительных интервалов критических выходных параметров в уровнях сигма (среднеквадратического отклонения) или вероятностях отказа.

При оценке робастности целевой функцией (выходной характеристикой) являлось максимальное значение обратного коэффициента запаса прочности. Входными характеристиками, определяющими разброс выходной характеристики, являлись:

- характеристики упругих свойств материалов слоев композита;
- углы ориентации тканых и однонаправленных слоев.

В работах [8–10] были определены статистические характеристики и функции распределения входных параметров, разброс которых был обусловлен наличием в ПСКМ технологических дефектов:

– коэффициенты вариации характеристик упругих свойств материалов слоев ПСКМ составляют 5,1%, распределения характеристик подчиняются нормальному закону;

– распределение углов укладки тканых и однонаправленных слоев композита подчиняется нормальному закону, среднеквадратические отклонения составляют 3,4°. При проведении анализа считалось, что математическое ожидание углов укладки равно номинальному.

Всего варьировались значения четырех упругих моделей и углы укладки 11 тканых и однонаправленных слоев.

На основе этих данных методом латинского гиперкуба был сформирован набор расчетных точек и определены дисперсии каждого выходного параметра. Для заданного уровня сигма (шесть сигма) для входных величин определены доверительные интервалы. Применение метамоделей оптимального прогноза позволило оценить влияние разброса входных величин на выходную характеристику с помощью коэффициентов прогноза, построить гистограмму распределения обратного коэффициента запаса прочности и определить статистические характеристики полученного распределения.

Полученная в результате проведения анализа робастности поверхность оптимального прогноза показана на рис. 9,*а*, гистограмма распределения обратного коэффициента запаса прочности – на рис. 9,*б*, коэффициенты прогноза – на рис. 9,*в*, статистические характеристики распределения – на рис. 9,*г*.

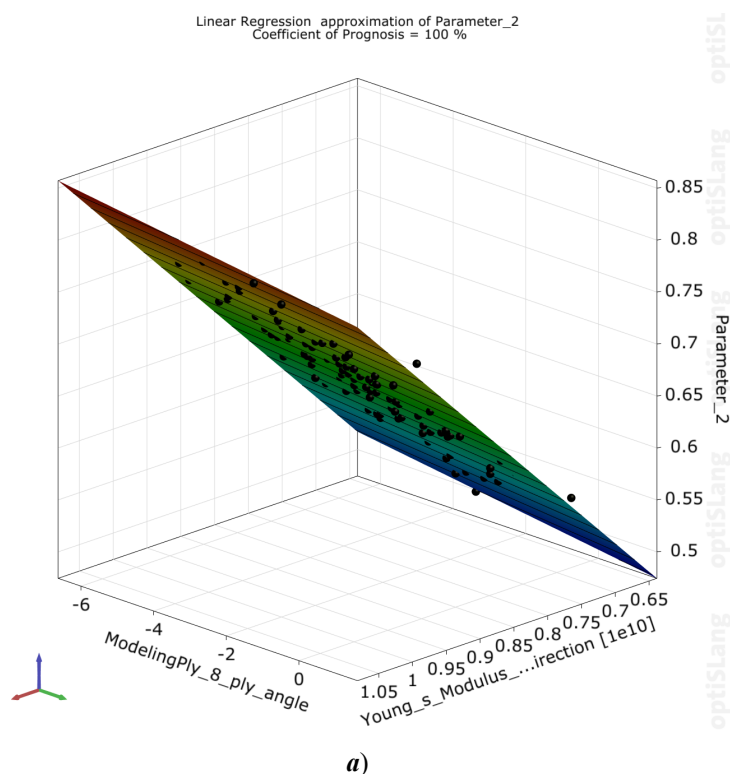


Рис. 9. Результаты анализа робастности: *а* – поверхность оптимального прогноза;

б – гистограмма распределения обратного коэффициента запаса прочности;

в – коэффициенты прогноза; *г* – статистические характеристики распределения

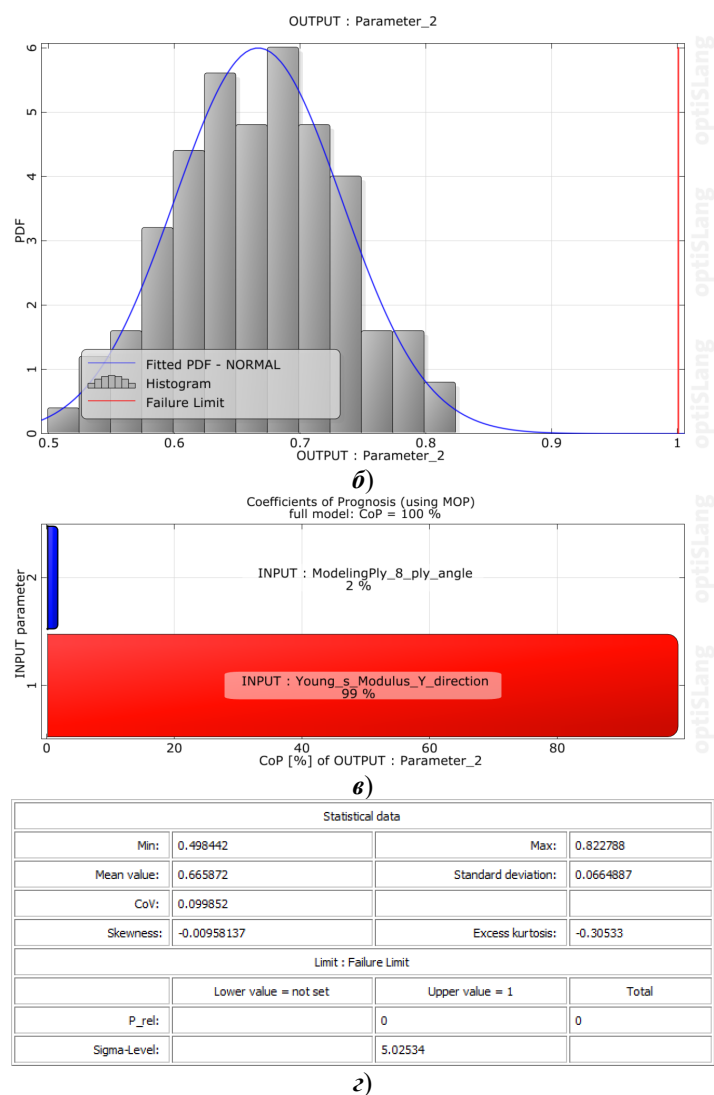


Рис. 9. Окончание

Анализ робастности позволил сделать следующие выводы:

– наибольшие значения коэффициентов прогноза имеют модуль продольной упругости E_2 однонаправленного слоя (98 %) и угол укладки восьмого слоя (2 %), поэтому именно эти входные характеристики учтены в метамодели оптимального прогноза;

– распределение выходной характеристики подчиняется нормальному закону, математическое ожидание максимального значения обратного коэффициента запаса прочности равно 0,666, среднеквадратическое отклонение – 0,0665, доверительный интервал при уровне 6-сигма составляет [0,498 0,823];

– разность между пределом максимального значения обратного коэффициента запаса прочности и его математическим ожиданием имеет уровень, равный 5,025-сигма, что соответствует вероятности превышения обратного коэффициента запаса прочности своего предела (равного единице) менее 0,001.

Вероятность превышения значения обратного коэффициента запаса прочности своего предела мала, поэтому оценка уровня сигма должна быть дополнительно подтверждена анализом надежности [13].

5. Анализ надежности

Одним из основных методов оценки надежности, который используется при имитационном моделировании, является метод Монте-Карло. Одним из основных недостатков этого метода является чрезмерно высокая вычислительная ресурсоемкость. Эффективность других методов оценки надежности [13] зависит от уровня сигма, числа входных случайных переменных, числа возможных механизмов отказа и свойств функций предельных состояний. Если функции предельных состояний непрерывны и дифференцируемы, то эффективными будут метод анализа надежности первого порядка (FORM) и метод выборки по значимости (ISPUD). Однако применение этих методов ограничено только одним преимущественным механизмом отказа. Методы целенаправленной и адаптивной выборки (Directional и Adaptive Sampling) могут применяться при умеренном числе случайных переменных при наличии нескольких механизмов отказа и небольших вероятностях. Если число случайных параметров больше 20, то наиболее эффективным методом становится метод, основанный на построении адаптивной поверхности отклика (ARSM). Кроме того, для большого числа переменных и небольших вероятностей отказа есть метод асимптотической выборки (Asymptotic Sampling). Для оценки надежности трубчатой направляющей был использован метод, основанный на построении адаптивной поверхности отклика (ARSM). Некоторые результаты оценки надежности приведены на рис. 10.

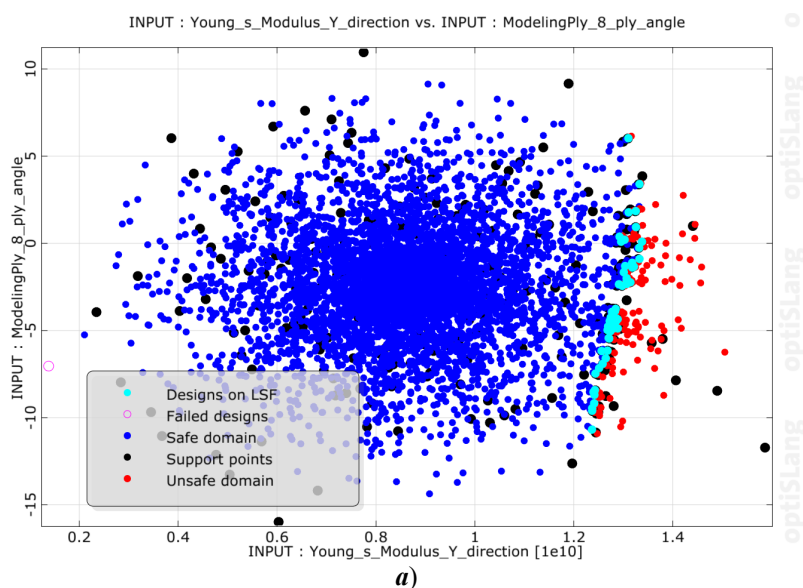
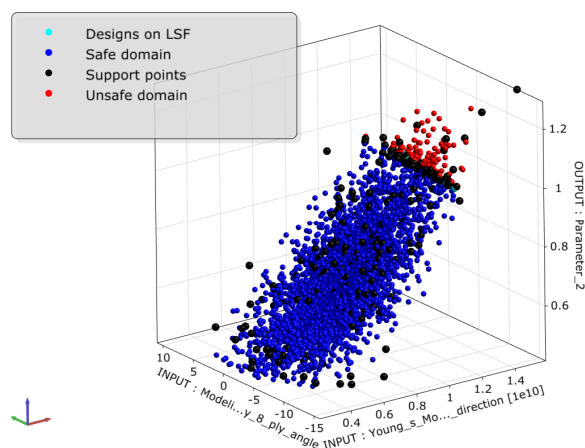


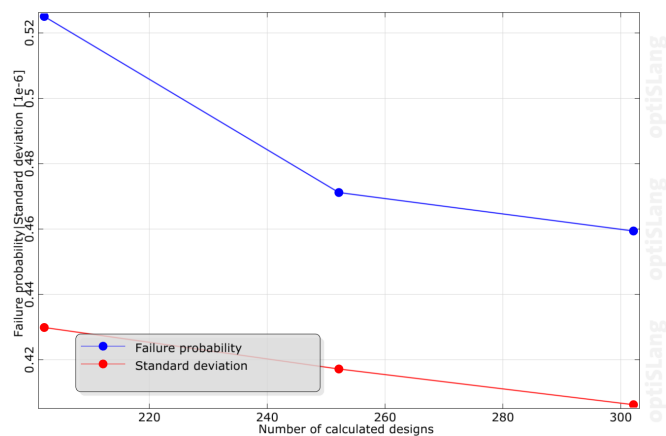
Рис. 10. Результаты анализа надежности: *a* – двухмерный график Антхилла; *б* – «облако надежности»; *в* – история оценки надежности; *г* – характеристики используемого метода

INPUT : Young_s_Modulus_Y_direction vs. INPUT : ModelingPly_8_ply_angle vs. OUTPUT : Parameter_2

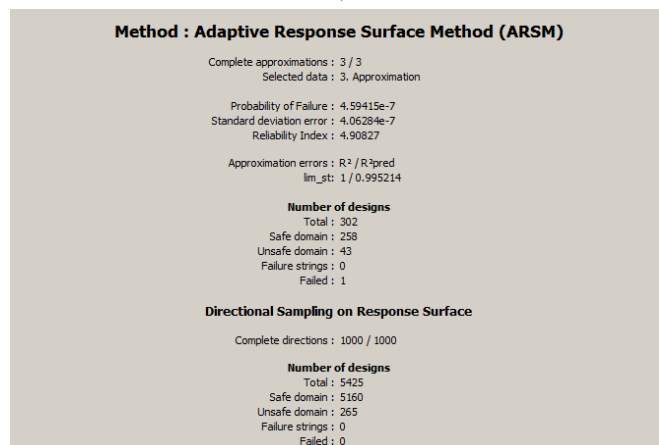


б)

Result history



в)



г)

Рис. 10. Результаты анализа надежности: а – двухмерный график Анхилла; б – «облако надежности»; в – история оценки надежности; г – характеристики используемого метода

Результаты оценки надежности позволили сделать следующие выводы:

- вероятность непревышения максимального значения обратного коэффициента запаса прочности своего предела составляет $4,59 \cdot 10^{-7}$;
- коэффициент детерминации используемой модели оптимального прогноза составляет 100, а значение улучшенного коэффициента детерминации 0,995.

Заключение

Разработана методика оптимального проектирования трубчатых направляющих из ПСКМ. Основными задачами, решаемыми в рамках методики оптимального проектирования трубчатых направляющих из ПСКМ, являются анализ чувствительности, многокритериальная оптимизация, оценка робастности и анализ надежности.

Разработана компьютерная модель трубчатой направляющей из ПСКМ, учитывающая структуры ламината и действующие на нее нагрузки.

Анализ чувствительности позволил выделить основные факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние трубчатой направляющей и отбросить второстепенные.

Оптимизация конструкции трубчатой направляющей позволила определить оптимальную структуру ламината, что привело к сокращению массы направляющей с 17,1 до 2,931 кг.

Анализ робастности позволил выделить параметры, оказывающие наибольшее влияние на прочность трубчатой направляющей, установить, что распределение обратного коэффициента запаса прочности подчиняется нормальному закону, в также определить вероятностные характеристики этого распределения.

Анализ надежности позволил уточнить вероятность непревышения максимальным значением обратного коэффициента запаса прочности своего предела.

Список литературы

1. Богомолов А. И., Муйземнек А. Ю., Рыбаков А. А. Применение ANSYS при проектировании пусковой направляющей БМ РЗСО // Пути повышения эффективности применения ракетно-артиллерийских комплексов : материалы XXXI Межвуз. науч.-техн. конф. ПАИИ. Пенза : ПВАИУ, 2001. С. 125–126.
2. Муйземнек А. Ю., Савицкий В. Я., Нестеров С. А. Особенности подготовки исходных данных для построения микромеханических моделей слоистых пластинок // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2015. № 1. С. 152–162.
3. Жуков И. Е., Миляев А. В., Муйземнек А. Ю., Котосов А. А. Компьютерное моделирование сопротивления деформированию и разрушения дискретно-тканевых оболочек бронешлема при высокоскоростном ударе // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 3-4. С. 21–27.
4. Карташова Е. Д., Косова М. А., Желудкова А. А., Муйземнек А. Ю. Расчет межслойных напряжений в композиционных оболочках с двоякой положительной кривизной // Актуальные проблемы науки и образования. 2017. № 2. С. 105–111.
5. Богомолов А. И., Муйземнек А. Ю., Карташова Е. Д. Модели сопротивления деформированию и разрушению дискретно-тканевых преград при ударном нагру-

- жении // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 2. С. 154–167.
6. Муйземнек А. Ю., Савицкий В. Я. Модели сопротивления деформированию и разрушения тканей из арамидных нитей при ударном нагружении // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 3. С. 168–178.
 7. Муйземнек А. Ю. Исследование сопротивления деформированию и разрушения дискретно-тканевых оболочек с двоякой положительной кривизной // Вестник Пензенского государственного университета. 2016. № 2. С. 100–116.
 8. Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Влияние технологических отклонений расположения армирующего в полимерном слоистом композиционном материале на сопротивление деформированию и разрушению // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 3. С. 134–145.
 9. Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2. С. 79–89.
 10. Карташова Е. Д., Косова М. А., Желудкова А. А., Муйземнек А. Ю. Влияние технологии изготовления на уровень дефектности полимерных слоистых композиционных материалов // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : материалы III Всерос. науч.-техн. конф. Пенза, 2018. С. 189–192.
 11. Карташова Е. Д., Косова М. А., Желудкова А. А., Муйземнек А. Ю. Компьютерное моделирование драпировки ткани в процессе производства слоистых композитов // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы. (МСНПК-2017) : сб. науч. ст. IV ежегодной межвуз. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 15 марта 2017). Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. С. 325–327.
 12. Муйземнек А. Ю., Карташова Е. Д. Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. 77 с.
 13. Methods for multi-disciplinary optimization and robustness analysis Dynardo GmbH, Weimar. Issue: September 23, 2018.

References

1. Bogomolov A.I., Muzyemnek A.Yu., Rybakov A.A. Using ANSYS in the design of the MLRS launch guid. *Puti povysheniya effektivnosti primeneniya raketno-artilleriyskikh kompleksov: materialy XXXI Mezhvuz. nauch. tekhn. konf. PAII = Ways to improve the efficiency of the use of rocket and artillery systems: proceedings of the 31st International scientific and engineering conference*. Penza: PVAIU, 2001:125–126. (In Russ.)
2. Muzyemnek A.Yu., Savitskiy V.Ya., Nesterov S.A. Features of the preparation of initial data for the construction of micromechanical models of laminated plastics. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2015;(1):152–162. (In Russ.)
3. Zhukov I.E., Milyaev A.V., Muzyemnek A.Yu., Kotosov A.A. Computer simulation of the resistance to deformation and destruction of discrete-tissue shells of an armored helmet during a high-speed impact. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskies sredstva protivodeystviya terrorizmu = Issues of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism*. 2018;(3-4):21–27. (In Russ.)
4. Kartashova E.D., Kosova M.A., Zheludkova A.A., Muzyemnek A.Yu. Calculation of interlayer stresses in composite shells with double positive curvature. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya = Actual problems of science and education*. 2017;(2):105–111. (In Russ.)
5. Bogomolov A.I., Muzyemnek A.Yu., Kartashova E.D. Models of resistance to deformation and fracture of discrete tissue barriers under impact loading. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskies nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2018;(2):154–167. (In Russ.)

6. Muzyemnek A.Yu., Savitskiy V.Ya. Models of resistance to deformation and destruction of fabrics from aramid yarns under impact loading. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2016;(3):168–178. (In Russ.)
7. Muzyemnek A.Yu. Investigation of resistance to deformation and destruction of discrete-tissue shells with double positive curvature. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Penza State University*. 2016;(2):100–116. (In Russ.)
8. Kartashova E.D., Muzyemnek A.Yu. The impact of technological deviations in the location of the reinforcing in a polymeric layered composite material on the resistance to deformation and destruction. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(3):134–145. (In Russ.)
9. Kartashova E.D., Muzyemnek A.Yu. Technological defects in polymer layered composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(2):79–89. (In Russ.)
10. Kartashova E.D., Kosova M.A., Zheludkova A.A., Muzyemnek A.Yu. Influence of manufacturing technology on the level of defectiveness of polymeric layered composite materials. *Innovatsii tekhnicheskikh resheniy v mashinostroenii i transporte: materialy III Vseros. nauch. tekhn. konf. = Innovations of technical solutions in mechanical engineering and transport: proceedings of the 3rd All-Russian scientific and engineering conference*. Penza, 2018:189–192. (In Russ.)
11. Kartashova E.D., Kosova M.A., Zheludkova A.A., Muzyemnek A.Yu. Computer simulation of fabric drapery during the production of layered composites. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy. (MSNPK-2017): sb. nauch. st. IV ezhegodnoy mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (g. Penza, 15 marta 2017) = Information technologies in science and education. Problems and prospects (MSNPK-2017): proceedings of the 4th annual interuniversity scientific and practical conference (Penza, March 15, 2017)*. Penza: Izd-vo PGU, 2017:325–327. (In Russ.)
12. Muzyemnek A.Yu., Kartashova E.D. *Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya polimernykh sloistykh kompozitsionnykh materialov: ucheb. posobie = Mechanics of deformation and destruction of polymer layered composite materials: textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2017:77.
13. *Methods for multi-disciplinary optimization and robustness analysis Dynardo GmbH*, Weimar. Issue: September 23, 2018.

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Николаевна Иванова

доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник отдела моделирования и синтеза технологических структур, Институт механики, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (Россия, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34); профессор кафедры автоматизации информационных и инженерных технологий, Чайковский филиал ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (Россия, г. Чайковский, ул. Ленина, 73)

E-mail: rsg078829@mail.ru

Tat'yana N. Ivanova

Doctor of engineering sciences, professor, senior staff scientist of the department of modeling and synthesis of technological structures, Institute of Mechanics, Udmurt Federal Research Center of Ural branch of the Russian Academy of Sciences (34 Tatyany Baramzinoy street, Izhevsk, Russia); professor of the sub-department of automation of information and engineering technologies, Tchaikovsky branch of the Perm National Research Polytechnic University (73 Lenina street, Tchaikovsky, Russia)

Екатерина Дмитриевна Карташова

инженер кафедры теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: katrina89@yandex.ru

Ekaterina D. Kartashova

Engineer of the sub-department
of theoretical and applied mechanics
and graphics, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Муйземнек

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: muyzemnek@yandex.ru

Aleksandr Yu. Muyzemnek

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 15.08.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 02.09.2022

Принята к публикации / Accepted 23.09.2022