

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛАСТИЧНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПОЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВОДОВ

*Проведено исследование алмазного эластичного инструмента, применяемого для полирования внутренних поверхностей волноводов, с помощью компьютерных программ SolidWorks и CosmosWorks, проверенное компьютерным моделированием в среде ANSYS. Применение подобных программных продуктов позволяет рассчитывать напряженно-деформированное состояние инструментов и выбирать их оптимальную конструкцию.*

*Ключевые слова:* шероховатость, полирование, эластичные инструменты, моделирование, алмазные инструменты.

По условиям эксплуатации летательных аппаратов внутренняя поверхность ряда трубопроводов должна иметь зеркальное отражение. Отметим, что поверхность становится оптически гладкой и блестящей только тогда, когда величина неровностей на ней меньше половины длины волны видимого света, т. е. эта величина не должна превышать 0,2 мкм.

Способ абразивного полирования отверстий некруглого сечения эластичным инструментом из полиуретана SKU-ПФЛ 100 с нанесенными абразивными зернами АСМ 60/40 [1] предназначается для снижения шероховатости внутренних токонесущих поверхностей волноводов, но он может быть применена для любых других трубопроводов, требующих отделочной обработки. Профиль полирующего инструмента повторяет профиль обрабатываемого отверстия детали. Полости инструмента выполнены в виде усеченной пирамиды и повторяют наружный профиль. Полирование осуществляется за несколько циклов.

Обработка алмазными эластичными инструментами (ЭИ) обеспечивает стабильное качество поверхности изделий из цветных металлов и сталей за счет температуры полирования, уменьшения остаточных напряжений и шероховатости, способствует повышению производительности обработки и стойкости алмазного инструмента до 20 раз по сравнению с другими абразивными эластичными инструментами.

Алмазные эластичные инструменты должны быть износостойким длительное время и создавать давления, при которых обеспечивается полирование поверхности волновода по периметру и всей длине [2]. Эластичные полировальные инструменты являются более управляемыми, поскольку их конструктивные параметры позволяют изменять свойства инструментов в нужном направлении.

В качестве основы для инструмента выбран полиуретан. Он эластичен, работает в интервале температур от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ , кислотостоек, характеризуется повышенной износостойкостью, высокой прочностью, масло- и бензостойкостью, устойчивостью к среде кислорода. Относительное удлинение полиуретана — не менее 300 %; условная прочность при растяжении — не менее 30 МПа; остаточное удлинение при разрыве — не более 10 %; твердость по Шору — А 80...90 условных единиц; прочность на раздир — не менее 100 Н/мм; сопротивление к истиранию (DIN 53516) — не более 0,05 см<sup>3</sup>.

Процесс полирования предполагает, что эластичный инструмент в виде стержня, повторяющего профиль се-

чения волновода и покрытый алмазными зернами, в процессе работы будет находиться в напряженно-деформированном состоянии. При сжатии поперечные размеры инструмента будут изменяться.

Практически во всех публикациях, в которых рассматриваются технологические аспекты формообразования деталей из трубчатых и полых заготовок эластичным инструментом, говорится о том, что при выборе и расчете оборудования необходимо учитывать усилие, затрачиваемое на деформирование эластичного инструмента. Для этого предлагается использовать экспериментально полученные характеристики сжатия эластичных деталей типа шайб и втулок.

При разработке процессов с управляемым формоизменением полуфабриката характеристики сжатия и растяжения эластомеров имеют первостепенное значение, поэтому они должны учитывать конкретные условия нагружения и быть удобными для пользования.

Работоспособность инструментов на эластичной основе во многом зависит от режимов и условий обработки, которые выбираются с учетом их физико-механических и теплофизических свойств. Наиболее важными являются механические характеристики: число эластичности  $N_p$ , модуль упругости основы при растяжении  $E$ , модуль упругости сжатия алмазоносного слоя  $E_c$ , допустимое напряжение  $[\sigma]$ . При эксплуатации эластичный инструмент с закрепленными алмазными зернами испытывает деформации по всем трем координатам. Следует также отметить, что детали, изготавливаемые из полиуретана, могут иметь сложную конфигурацию и подвергаться воздействиям различных сил.

Рассмотрим конструкции эластичных инструментов с профилем, повторяющим форму обрабатываемого отверстия с внутренними полостями:

- составной инструмент из одинаковых прямоугольных шайб с отверстиями и одной шайбы без отверстия (рис. 1);
- стержень сплошной полиуретановый прямоугольного сечения;
- стержень полиуретановый прямоугольного сечения, повторяющий профиль заготовки с симметричными полостями в виде цилиндра (рис. 2);
- стержень полиуретановый прямоугольного сечения, повторяющий профиль заготовки с симметричными полостями в виде усеченной пирамиды (рис. 3, 4, а);
- стержень полиуретановый прямоугольного сечения, повторяющий профиль заготовки с полостями в виде

усеченной пирамиды и увеличенной толщиной стенки по большей стороне (рис. 4, б);

– стержень полиуретановый прямоугольного сечения, повторяющий профиль заготовки с симметричными полостями в виде параллелепипеда с одинаковой толщиной стенки (рис. 4, в);

– стержень полиуретановый прямоугольного сечения, повторяющий профиль заготовки с симметричными полостями в виде параллелепипеда с увеличенной толщиной стенки по большей стороне (рис. 4, з);

– стержень полиуретановый прямоугольного сечения, повторяющий профиль заготовки с симметричными полостями в виде усеченной пирамиды, в углах которой расположены четыре отверстия радиусом 1 мм, и с увеличенной толщиной стенки по большей стороне (рис. 4, д).

Инструмент, представленный на рис. 1, состоит из восьми одинаковых прямоугольных шайб с отверстиями и одной шайбы без отверстия с размерами  $2a \times 2b \times h_1$ , где  $a$  и  $b$  – стороны,  $h_1$  – высота, общей высотой  $H$ .

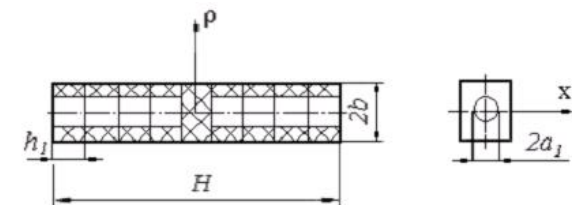


Рис. 1. Составной инструмент из полиуретана (обозначения см. в тексте)

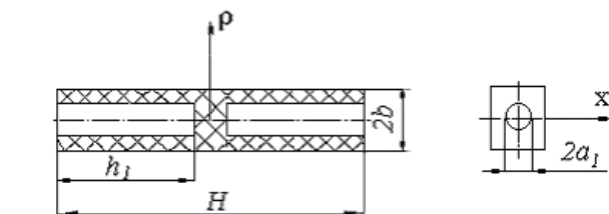


Рис. 2. Инструмент из полиуретана с полостями в виде цилиндра (обозначения см. в тексте)

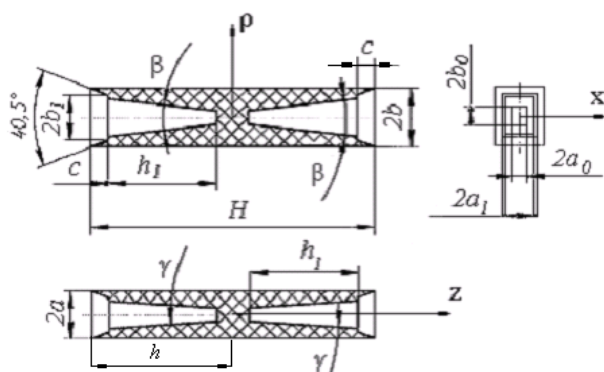


Рис. 3. Инструмент из полиуретана с полостями в виде усеченной пирамиды (обозначения см. в тексте)

Этот инструмент с нанесенными абразивными зернами может быть применен для полирования. Его целесообразно использовать, когда нужно изменять длину инструмента. Технология его изготовления более простая, чем у других инструментов, но конструкция достаточно жесткая и требуются большие усилия для его деформации. Поэтому инструмент со сплошным стержнем прямоугольного сечения не может быть применен в таком качестве как мало деформируемый: при твердости 90 и более единиц по Шору он практически не изменяет своего поперечного сечения, а максимальное сжимающее напряжение для пластинки с малым отверстием в 3 раза больше напряжения в пластинке без отверстия [4].

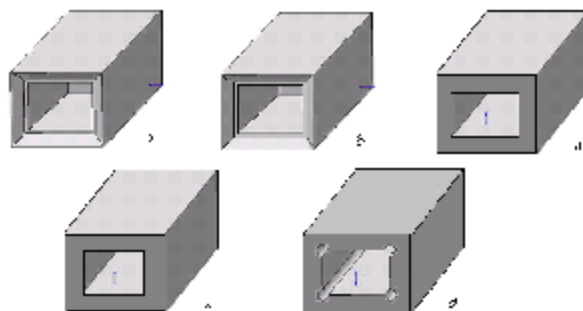


Рис. 4. Конструкции эластичных инструментов для исследования напряженно-деформированного состояния с полостями: а – в виде усеченной пирамиды; б – в виде усеченной пирамиды с измененной толщиной стенки; в – в виде прямоугольного параллелепипеда; з – в виде прямоугольного параллелепипеда с измененной толщиной стенки; д – в виде усеченной пирамиды с измененной толщиной стенки и выемками в углах

Рассмотрим инструменты прямоугольного сечения с полостями в виде цилиндра и в виде усеченной пирамиды.

Инструмент прямоугольного сечения с полостями в виде цилиндра характеризуется внешними размерами  $2a \times 2b$ , внутренним диаметром отверстия  $2a_1$ , общей высотой  $H$  и высотой внутреннего отверстия  $h_1$  (см. рис. 2). Данный инструмент может быть применен в качестве эластичной основы. По конструкции он прост, изготовить его можно из цельной заготовки механическим способом, однако получить такой инструмент литьем в металлической форме оказалось технологически невозможно из-за отсутствия литейных уклонов. К тому же требуются значительные усилия для его деформации.

Инструмент прямоугольного сечения с полостями в виде усеченной пирамиды характеризуется четырьмя размерами: внешними размерами  $2a \times 2b$ , внутренними размерами  $a_1 \times b_1$  ( $a_0 \times b_0$ ) центрального отверстия, общей высотой  $H$  и высотой внутренней усеченной пирамиды  $h_1$  (см. рис. 3).

Выбор конструкции на основе теоретического определения напряженно-деформированного состояния инструментов с полостями в виде усеченной пирамиды, усеченной пирамиды без направляющего конуса и в виде усеченной пирамиды, в углах которой имеются выемки радиусом 1 мм, проводился с помощью компьютерных программ SolidWorks и CosmosWorks, которые позволяют создавать, анализировать, корректировать проекты и

решать задачи напряженно-деформированного состояния деталей машиностроения [5].

Целью компьютерного моделирования являлось определение конструкции инструмента, обеспечивающей прижим и полирование под действием удельного давления к внутренней обрабатываемой поверхности, для чего были созданы трехмерные модели исследуемого инструмента (см. рис. 4).

Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния инструмента выполнялось в следующем порядке:

- создание трехмерных моделей исследуемых инструментов;
- создание базы данных по материалу инструмента, включающей плотность, коэффициент Пуассона, модуль упругости, предел прочности, твердость, предел текучести;
- установление ограничений: 1 – к торцу (середине детали) в зафиксированном состоянии, 2 – к торцевой поверхности;
- установление предварительного давления (10 МПа);
- приложение нагрузки к торцевой поверхности и на полость инструмента в направлении, перпендикулярном выбранной грани и поверхности полости;
- выбор вида нагружения (последовательное);
- установление датчиков в наиболее характерных точках инструмента;
- создание сетки для расчета;
- анализ расчета напряженно-деформированного состояния инструмента;
- получение отчета.

Во время расчета весь исследуемый объем разделялся на элементарные ячейки кубической формы, при этом точность полученных результатов зависела от количества и размера элементарных ячеек (рис. 5).

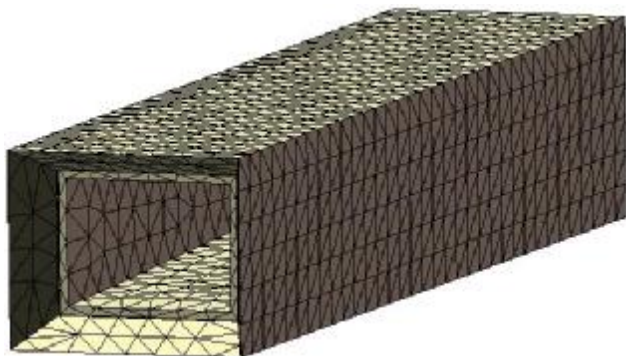


Рис. 5. Пример создания сетки для расчета напряженно-деформированного состояния инструмента

Используемое разбиение – стандартное, автоматическое уплотнение и сглаживание поверхности включены, допуск – 0,116 13 мм, качество высокое, количество элементов – 4 288, количество узлов – 7 167. Тип решающей программы – FFEPlus, качество – высокое, параметр «Тепловые эффекты» включен. Дополнительные параметры управления решением следующие: метод управления – сила; метод повторов – метод Ньютона–Рафсона; допуск сходимости – 0,001 4; допуск инкремента деформации для пластиковых деталей – 0,01.

Расчет показал, что полиуретановый стержень прямоугольного сечения, повторяющий профиль заготовки с симметричными полостями в виде усеченной пирамиды (см. рис. 4, а), имеет наибольшее перемещение в средней части и на направляющей кромке – 18 мм, по углам утягивается от 3 до 7 мм и испытывает во внутренней полости растягивающие перемещения 11...17 мм по меньшей стороне и сжимающие перемещения 2,4...5 мм по большей стороне. В середине по высоте инструмент испытывает деформацию сжатия. Не исключена поломка направляющей кромки, где величина наибольшей деформации составляет 105 МПа.

При компьютерном моделировании таких перемещений (18...23 мм) не наблюдается. Однако отмечаются растягивающие перемещения по большей стороне и сжимающие – по меньшей. На этом этапе было принято решение, увеличить толщину стенки с 2,45 до 3,3 мм по большей стороне. Полученные результаты говорят о приемлемости такого решения.

Для решения вопроса о том, как обеспечить лучший контакт инструмента с заготовкой в области углов (см. рис. 4, д), исследовано напряженно-деформированное состояние инструмента, во внутренней полости которого имеются дополнительные выемки радиусом 1 мм (рис. 6).

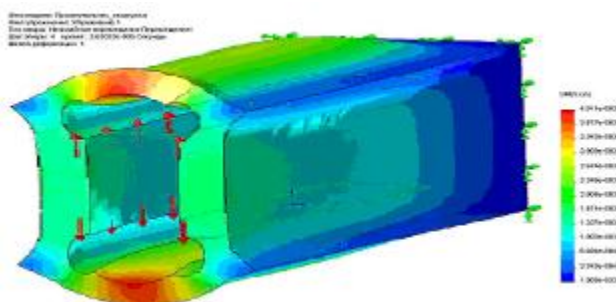


Рис. 6. Напряженно-деформированное состояние ЭИ с полостью в виде пирамиды и дополнительными отверстиями в углах

После проведения компьютерного моделирования с помощью программ SolidWorks, CosmosWorks были сделаны выводы, что эти программы могут быть использованы при расчете напряженно-деформированного состояния инструмента, но графическое представление результатов такого расчета не соответствует действительности, что явно заметно на рис. 6. Проведенное компьютерное моделирование в среде ANSYS (рис. 7...9) позволило добиться того, что перемещения по сторонам инструмента стали отличаться на 0,02 мм, а в углах и середине они снизились от 0,003 43 до  $1 \cdot 10^{-30}$  мм от исходного положения.

Результаты компьютерного моделирования в среде ANSYS также показали, что эластичный полировальный инструмент с полостями в виде усеченной пирамиды, в углах которой имеются дополнительные отверстия радиусом 1 мм (рис. 4, д и рис. 10), был признан оптимальным для абразивного полирования волноводов прямоугольного сечения.

Таким образом, при разработке технологического процесса абразивного полирования уже на этапе про-

ектирования можно оценить элементы конструкции эластичного инструмента, режимы полирования, провести его виртуальные испытания и изменить параметры без каких-либо дополнительных материальных затрат.

### Библиографический список

1. Способ абразивного полирования отверстий некруглого сечения эластичным инструментом : заявка на изобретение / Л. В. Зверинцева, С. К. Сысоев. Иск. № 2008111549 ; заявл. 25.03.2008.

2. Зверинцева, Л. В. Инструмент для абразивного полирования внутренней поверхности волноводов космических аппаратов / Л. В. Зверинцева // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 1(18). С. 162–166.

3. Boonstra, B. / B. Boonstra // Rubb. Chem. Technol. 1951. Vol. 24, № 1. P. 70.

4. Зубчанинов, В. Г. Основы теории упругости и пластичности : учебник для машиностроит. спец. вузов / В. Г. Зубчанинов. М. : Высш. шк., 1990.

5. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др. СПб. : БХВ-Петербург, 2005.

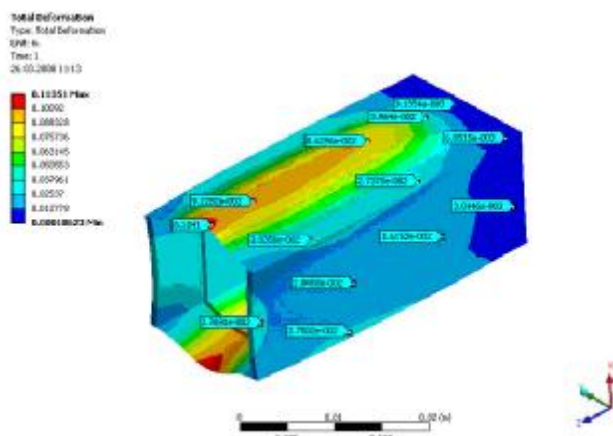


Рис. 7. Пример суммарной деформации инструмента

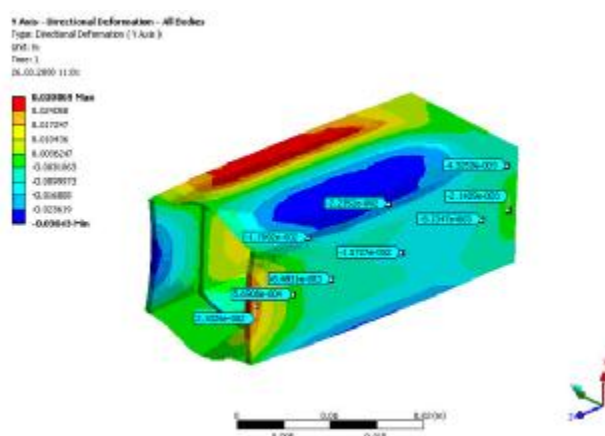


Рис. 8. Напряженно-деформированное состояние ЭИ с одинаковой толщиной стенок

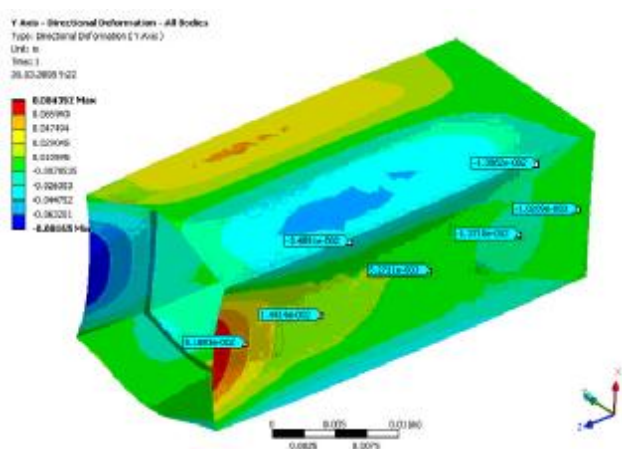


Рис. 9. Напряженно-деформированное состояние ЭИ с разной толщиной стенок

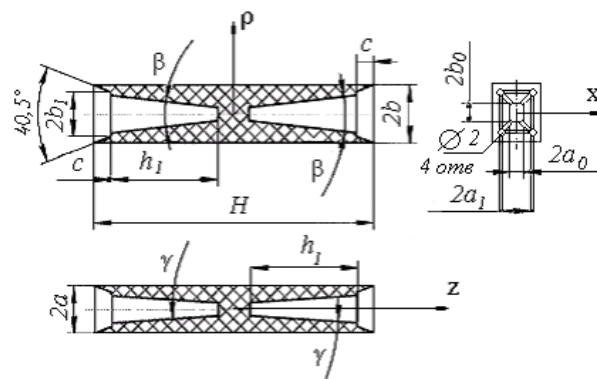


Рис. 10. Инструмент из полиуретана с полостями в виде усеченной пирамиды, в углах которой имеются дополнительные выемки радиусом 1 мм

L. V. Zverintseva

## COMPUTER MODELLING OF THE ELASTIC TOOL FOR POLISHING WAVE GUIDES

*The diamond elastic tool used for polishing internal surfaces of wave guides is investigated and checked with the help of computer programs Solid Works, Cosmos Works by computer modeling in ANSYS environment. Similar software products application allows to determine tensely-deformed condition of tools and to choose an optimum design.*

**Keywords:** roughness, burnishing, flexible tools, simulation, diamond tools.

© Зверинцева Л. В., 2009