

*М. А. Леган, А. А. Пьянзин, П. И. Зубков, В. П. Зубков, А. В. Таланин*

## **Проектирование и расчет напряженно-деформированного состояния центробежного ускорителя частиц порошка**

*M. A. Legan, A. A. Pyanzin, P. I. Zubkov, V. P. Zubkov, A. V. Talanin*

## **Design of Centrifugal Accelerator of Powder Particles and Its Stress-Strain State Calculation**

Представлены результаты проектирования центробежного ускорителя и исследования его напряженно-деформированного состояния, проведенного с помощью программного продукта SolidWorks. Построена конечно-элементная модель исследуемой детали в контакте с валом, на конусную поверхность которого она устанавливается. При этом использовалась сетка высокого качества с параболическими тетраэдральными элементами. Решение нелинейной контактной задачи получено с помощью итерационного алгоритма. Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что максимальные напряжения возникают в области контакта ускорителя и вала. Для уменьшения контактных напряжений рекомендовано увеличить площадь поверхности контакта, т. е. сделать конусную поверхность гладкой. Экспериментально определены модуль упругости и условный предел текучести высокопрочного алюминиевого сплава В96Ц1 Т1. Выполнен расчет на прочность центробежного ускорителя частиц порошка с учетом напряжений, возникающих в зоне контакта вращающейся детали с валом. Получена оценка радиальной скорости вылета частиц порошка из ускорителя. Указаны основные преимущества холодного напыления порошковых покрытий по сравнению с другими методами, сопровождаемыми огнем воздействием на материал.

*Ключевые слова:* центробежный ускоритель, порошковое покрытие, оценка прочности, контактные напряжения.

In the paper, design of a centrifugal accelerator and its stress-strain analysis carried out with the SolidWorks software are presented. A finite element model of an accelerator part placed on a shaft with conical surface is elaborated. The model uses high-quality grid of parabolic tetrahedral elements. The nonlinear contact problem is solved by iterative algorithm. Stress-strain analysis shows the maximum stress at the point where accelerator contacts with the shaft. Amount of the stress can be reduced by increasing the contact area and making the conical surface smooth. Elasticity modulus and conventional yield limit for high-strength aluminum alloy V96Ts1 T1 are estimated experimentally. Strength calculation for centrifugal accelerator of powder particles is performed with consideration of stress at the point where the accelerator contacts with the shaft. Also, radial speed of particles emerging from the accelerator is evaluated. Advantages of cold spraying of powders over other techniques of hot-spray coating are demonstrated.

*Key words:* centrifugal accelerator, powder coating, strength evaluation, contact stress.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-16

**1. Объект исследования.** Центробежный ускоритель представляет собой трубку переменного сечения, вращающуюся вокруг центральной оси, перпендикулярной оси трубки. Ускоритель служит для напыления порошка, засыпаемого сверху в центральное отверстие и вылетающего по радиальному каналу из концов трубки при ее вращении. Фотография детали и ее эскиз представлены на рисунке 1 и 2. Расчет проведен для центробежного ускорителя радиуса  $R = 0,32$  м, который вращается в вакуумной камере с угловой скоростью  $\omega = 3822$  рад/с. Тангенциальная скорость концов трубки достигает величины  $v_t = \omega R = 1223$  м/с. Радиальную скорость

вылета частиц порошка из ускорителя можно оценить по формуле  $v_r = (\sqrt{1 + \mu^2} - \mu) \omega R$ , если считать коэффициент трения скольжения  $\mu$  частиц порошка о стенку канала постоянным. Тогда тангенс угла  $\alpha$  между касательной к окружности, описываемой концом трубки, и направлением вылета частиц равен  $\operatorname{tg}(\alpha) = \sqrt{1 + \mu^2} - \mu$ . При столкновении частиц порошка с установленными по периметру мишенями из различных материалов возможно напыление частиц порошка на материал, так как скорость частиц порошка  $v = \sqrt{v_t^2 + v_r^2}$  достаточно велика. Она превышает тангенциальную скорость концов трубки  $v_t$ , но не более чем в  $\sqrt{2}$  раз.

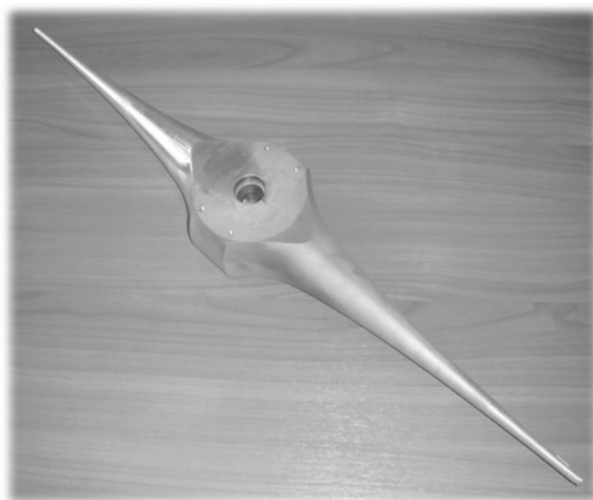


Рис. 1. Общий вид центробежного ускорителя

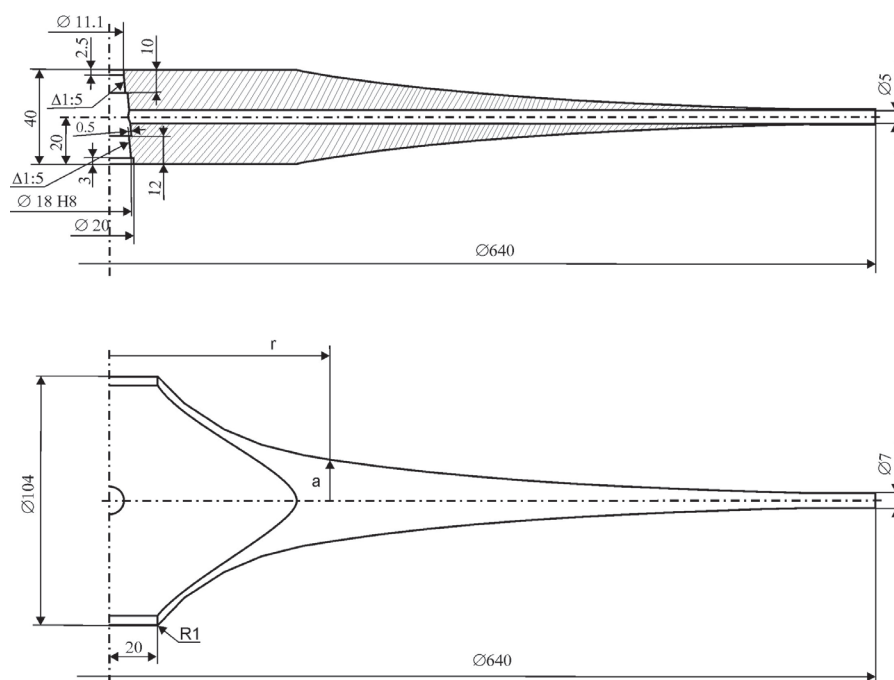


Рис. 2. Эскиз детали

Основными преимуществами холодного напыления, в том числе холодного газодинамического напыления [1], по сравнению с другими методами нанесения покрытий, сопровождаемыми огневым воздействием на материал, являются:

1. Возможность напыления частиц размером менее 10 мкм.
2. Возможность использования порошков из полимеров.
3. Меньшая повреждаемость полимерных материалов.
4. Возможность регулирования интенсивности напыления и скорости частиц порошка.

Материал ускорителя — высокопрочный алюминиевый сплав В96Ц1 Т1, который прошел термическую обработку, включающую закалку в воде с температуры 470 °С и старение 3 часа при 120 °С + 7 часов при 160 °С. Для данного сплава значения плотности  $\rho = 2890 \text{ кг/м}^3$  и коэффициента Пуассона  $\nu = 0,33$  взяты из справочников, а модуль Юнга  $E = 76,1 \text{ ГПа}$  и условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 687 \text{ МПа}$  определены экспериментально с помощью испытательной машины Zwick/Roell Z100. Диаграмма деформирования сплава В96Ц1 Т1 близка к идеально упруго-пластической [2].

Разрушение ускорителя чрезвычайно опасно из-за высоких скоростей разлета обломков и большой кинетической энергии, запасенной во вращающейся детали. Поэтому расчет ускорителя на прочность должен быть достаточно точным и надежным.

**2. Проектирование и расчет центробежного ускорителя.** При проектировании предполагалось, что напряжения, возникающие от инерционных сил, равномерно распределены в поперечных сечениях детали. При удалении от конца трубки поперечное сечение оставалось постоянным на участке длиной 3 см, а затем увеличивалось. Зависимость радиуса сечений  $a$  от расстояния  $r$  от оси вращения детали принималась в виде экспоненциальной функции с отрицательным показателем:  $a(r) = a_0 \cdot e^{-cr^k}$ , где  $a_0$ ,  $c$ ,  $k$  — вычисляемые коэффициенты. Коэффициенты  $a_0$  и  $c$  находились с использованием заданных размеров поперечных сечений трубки в центральной части и на концах. Коэффициент  $k$  был получен из условия, согласно которому максимальное напряжение, действующее на расстоянии 0,2 м от оси вращения, равно максимальному напряжению на контуре центрального отверстия в детали с учетом коэффициента концентрации напряжений, равного 3,1. С помощью интегрирования в программе Mathcad вычислили распределение инерционной нагрузки по длине детали  $P(r)$ . Разделив нагрузку на площадь сечения  $S(r) = \pi a^2(r)$ , нашли распределение напряжения по радиусу от оси вращения в исследуемой детали. График распределения напряжений показан на рисунке 3.

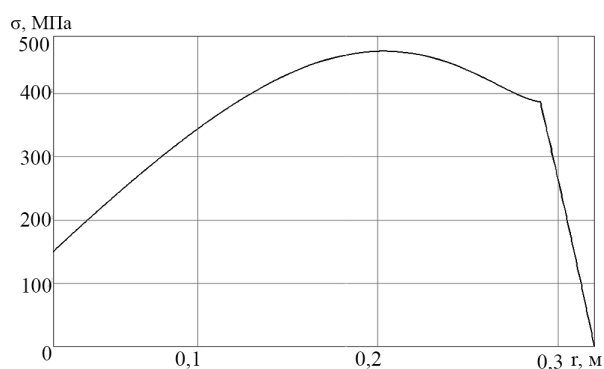


Рис. 3. График распределения напряжений, полученный с помощью программы Mathcad

В данном расчете не учитывалась неравномерность распределения напряжений в поперечных сечениях в центральной части детали, где имеются резкие изменения формы, поэтому для уточнения картины напряженно-деформированного состояния был использован пакет SolidWorks [3]. Причем для большей достоверности расчета решалась контактная задача взаимодействия детали с валом, на ко-

торый непосредственно устанавливается центробежный ускоритель.

В CAD системе SolidWorks была спроектирована твердотельная модель детали и вала. Для уменьшения времени расчета в качестве математической модели рассматривалась 1/4 часть ускорителя частиц порошка. Взаимодействие детали с валом было обеспечено условиями сопряжения. Далее была получена конечно-элементная модель с сеткой высокого качества (параболические тетраэдральные элементы). Размеры элементов на контактных поверхностях задавались равными 0,5 мм. Сетка также сгущалась вблизи радиального канала трубки. Размеры элементов на поверхности канала трубки были равны 1,5 мм. Глобальный размер — 2,5 мм. Количество элементов в результирующей модели — 82022. Количество узлов в модели — 121330.

Расчет напряженно-деформированного состояния производился в продукте Cosmos M, входящем в состав пакета SolidWorks. В опциях решателя была включена опция — большие перемещения и задан коэффициент трения между деталью и валом, равный 0,1. Также был включен метод решения, при котором в процессе вычисления, если погрешность вычислений высока, порядок аппроксимирующих многочленов возрастает. В качестве граничных условий для детали были применены ограничения симметрии и заделка на оси вала. Инерционная нагрузка, действующая на центробежный ускоритель, задавалась угловой скоростью и плотностью материала.

Перед решением задачи были произведены проверки сетки, которые реализованы в программе SolidWorks: количество искаженных элементов по Якобиану равно нулю. Процент элементов с соотношением сторон больше 10 равен нулю. Процент элементов с соотношением сторон меньше 3 равен 98,5%, что удовлетворяет условиям для качественного расчета.

Решение нелинейной задачи выполнялось посредством итерационного алгоритма с использованием алгоритма Ньютона-Рафсона. График распределения напряжений по радиусу от оси вращения, полученный с помощью программы SolidWorks, приведен на рисунке 4. Из сравнения рисунков 3 и 4 видно, что напряжения, полученные обоими методами, вдали от концентратора напряжений практически равны. Максимальное напряжение, действующее на расстоянии 0,2 м от оси вращения, равно 469 МПа, что составляет 68% от условного предела текучести  $\sigma_{0,2} = 687$  МПа. Заметим, что радиальное перемещение конца ускорителя достигает 1,5 мм.

Получившаяся после нелинейного анализа картина интенсивности напряжений вблизи концентратора приведена на рисунке 5. Данный расчет показывает,

что максимальные значения интенсивности напряжений  $\sigma_i^{\max}$  в местах контакта ускорителя и вала достигают величины 656 МПа, что только на 5% меньше  $\sigma_{0,2} = 687$  МПа. Для уменьшения контактных напряжений рекомендовано увеличить площадь поверхности контакта, т. е. сделать конусную поверхность гладкой (без выточки). В этом случае, согласно результатам расчета интенсивности напряжений, показанным на рисунке 6,  $\sigma_i^{\max} = 622$  МПа и коэффициент запаса прочности по пределу текучести  $k_T = \sigma_{0,2} / \sigma_i^{\max} = 1,1$ . Результаты расчета показывают, что для безопасной работы ускорителя в режиме включения-выключения нагрузки необходимо провести дополнительные испытания образцов с отверстием, моделирующих ускоритель, на малоцикловую усталость.

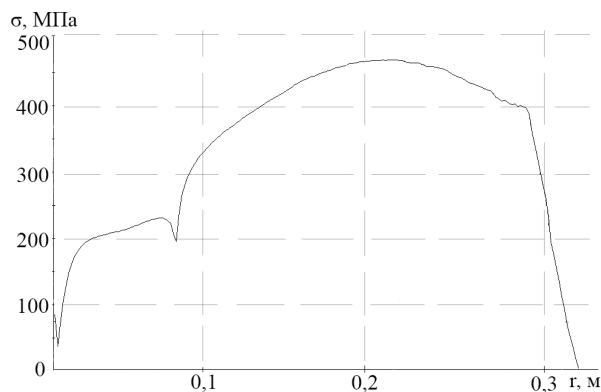


Рис. 4. График распределения напряжений, полученный с помощью программы SolidWorks

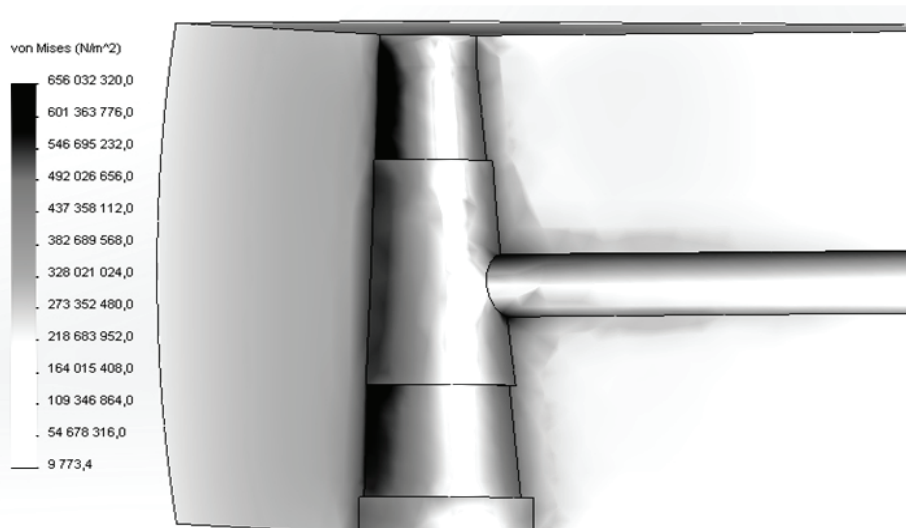


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений в центральной части детали

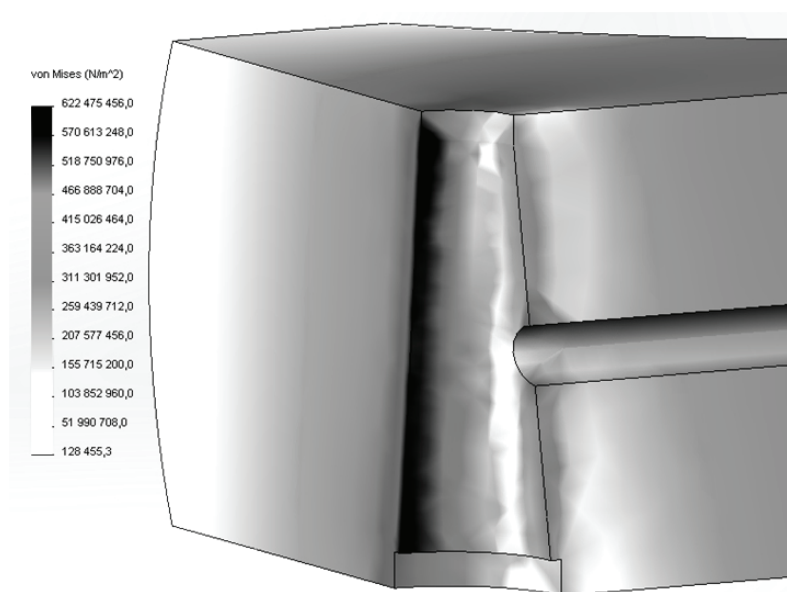


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений в окрестности гладкого конусного отверстия

**Заключение.** С помощью программного продукта SolidWorks проведен расчет на прочность центробежного ускорителя частиц порошка с учетом напряжений, возникающих в зоне контакта вращающейся де-

тали с валом. Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что максимальные напряжения возникают в области контакта ускорителя и вала. Даны рекомендации по уменьшению контактных напряжений.

### Библиографический список

1. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. — М., 2010.
2. Леган М.А., Карпов Е.В., Зубков В.П., Таланин А.В. Оценка предельного состояния полосы с отверсти-

ем по фиксации деформации начала текучести // Аэродинамика и прочность конструкций летательных аппаратов / под ред. А.Н. Серьезнова, В.К. Белова. — Новосибирск, 2011.

3. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. SolidWorks на примерах. — СПб., 2009.