

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.88.084.1 621.88.084.8

И. В. Абрамов, доктор технических наук, профессор
П. В. Лекомцев, старший преподаватель
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОСТОЙКОСТИ КОНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПАРЫ МАТЕРИАЛОВ «ТЕХНИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА – СТЕКЛО»

В статье представлены результаты исследования влияния температуры на прочность конического соединения с натягом деталей из пары материалов «техническая керамика – стекло». В результате планирования и проведения эксперимента получены регрессионные модели, отражающие зависимость термостойкости от натяга для рассматриваемых соединений, в том числе с промежуточным тонким токопроводящим слоем.

Ключевые слова: коническое соединение с натягом, термостойкость, математическое планирование эксперимента, регрессионный анализ, температурный коэффициент линейного расширения, техническая керамика, стекло.

Способность соединения сохранять свою прочность на осевой сдвиг при колебаниях температуры далее называется термостойкостью соединения. Исследование термостойкости заключалось в установлении температуры, при которой происходит распрессовка (расформирование) соединения под собственным весом одной из деталей сборки при неподвижной другой. Необходимость такого исследования обусловлена разными величинами коэффициента линейного расширения и, как следствие, колебаниями натяга при изменении температуры.

В работе под натягом Δd понимается измеренная разность диаметров охватывающей и охватываемой деталей. При сборке конических соединений с известной геометрией натяг задается относительным осевым перемещением собираемых деталей.

Для исследования НС конического соединения с натягом деталей из пары материалов «техническая

керамика – стекло» были разработаны и изготовлены опытные образцы (рис. 1). На рис. 2, а и б представлены эскизы охватывающей (основания) и охватываемой (штифта) деталей соответственно.

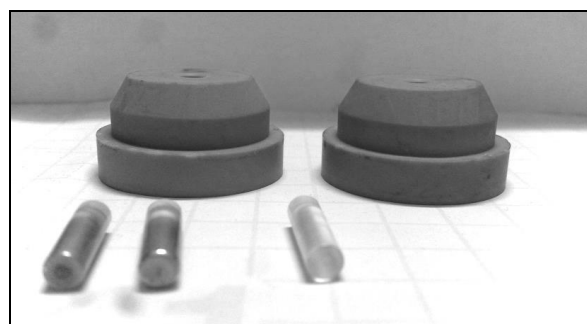


Рис. 1. Образцы деталей для запрессовки

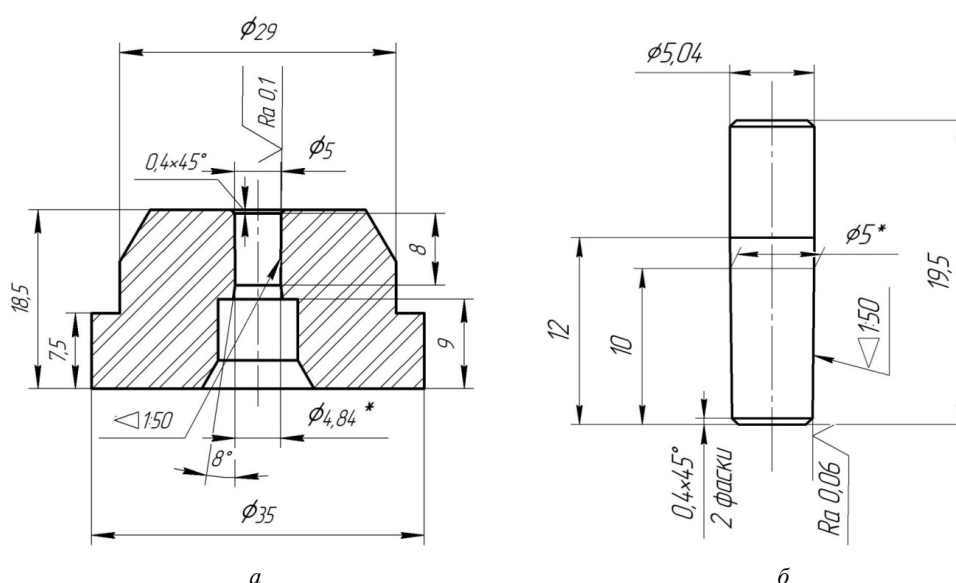


Рис. 2. Эскизы охватывающей (а) и охватываемой (б) деталей

После изготовления и обмера опытных образцов подбирались и маркировались наиболее близкие по углу конуса пары собираемых образцов. Далее проводилась операция притирки конических поверхностей. Качество притирки контролировалось припасовкой по краске, пятно контакта достигало 90 %.

Перед сборкой на конические поверхности части образцов охватываемых деталей были нанесены металлические покрытия. Операция нанесения на охватываемую деталь электропроводящего покрытия выполнялась магнетронным распылением мишени из хрома ЭРХ 99,95 (ТУ 14-22-138-2000) в среде инертного газа на установке «КРАУДИОН-11-06». Толщина покрытия задавалась временем напыления и контролировалась в пределах 0,01–0,05 мкм.

Материал основания – вакуумплотная корундовая керамика ВК94-1 (ТУ аЯ0.027.002.ТУ), штифта – стекло кварцевое КУ-1 (ГОСТ 15130–86). Термомеханические свойства материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Термомеханические свойства материалов деталей

Свойство	Ед. изм.	Материал			
		ВК94-1		КУ-1	
Коэффициент линейного расширения	1/°C	При T, °C	$\alpha \cdot 10^{-7}$	При T, °C	$\alpha \cdot 10^{-7}$
		20÷300	60	<-60	2
		300÷500	70	-60...50	4
				50...100	5
				100...150	5,5
500÷900	79	150...250	5,7		
		250...300	5,9		
		300...450	5,8		
Теплопроводность	Вт/(м·К)	32 (при 100 °C)	1,4 (при 100 °C)	12 (при 400 °C)	1,7 (при 400 °C)
Предел прочности при статическом изгибе	МПа	320		39	
Модуль упругости, E	ГПа	320–360		73,6	
Коэффициент Пуассона, μ		0,2		0,17–0,19	
Твердость по шкале Мооса		9		7	

Сборка образцов осуществлялась термическим методом. Для задания различных уровней натяга керамическое основание перед сборкой нагревалось до температуры, достаточной для образования монтажного зазора сопрягаемых деталей при требуемом натяге. В табл. 2 представлены температуры нагрева охватываемой детали при температуре охватываемой детали 25 °C для образования монтажного зазора не менее 1 мкм на средний диаметр конуса при разных натягах, полученные аналитическими расчетами [1].

Таблица 2. Температура нагрева основания

Натяг, мкм	2	3	4	5	6
Температура нагрева основания, °C	150	180	210	240	270

При сборке опытных образцов величина натяга задавалась с помощью регулируемого упора. На рис. 3 представлена схема получения зазора в осевом направлении $\Delta = h_2' - h_2$, где h_2 – положение упора (винта микрометрической головки), соответствующее базорасстоянию конусов до сборки с натягом, h_2' – положение упора, соответствующее требуемому значению зазора.

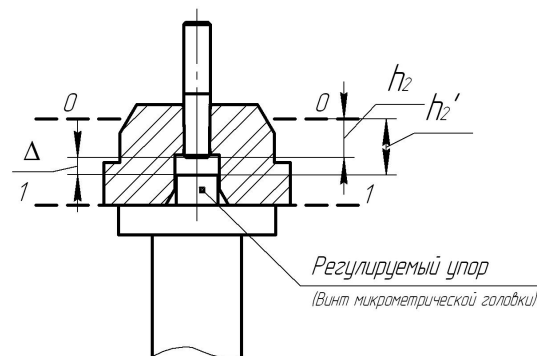


Рис. 3. Схема регулирования осевого зазора

Натяг в соединении задавался осевым перемещением штифта относительно основания на величину зазора и контролировался изменением базорасстояний конусов до и после сборки.

Максимальное отклонение фактического натяга после сборки от заданного – в пределах 0,3 мкм, среднее квадратическое отклонение температуры для каждого уровня натяга – не более 8 °C.

Для каждого уровня натяга методом конечных элементов по методологии решения контактных задач, принятой на кафедре «Мехатронные системы» ИжГТУ [2–7], были рассчитаны усилия распрессовки (табл. 3). Ввиду отсутствия экспериментальных данных о коэффициенте трения исследуемой пары материалов, в том числе с токопроводящим покрытием и без него, при расчетах был выбран коэффициент трения покоя «стекло – стекло» $f = 1$ [8]. Для проверки нагрузочной способности собранных образцов прикладывались осевые усилия, заведомо меньшие рассчитанных на 10 %.

Таблица 3. Расчетные усилия распрессовки

Натяг, мкм	2	3	4	5	6
Расчетное усилие распрессовки, кгс	3,7	5,5	7,6	9,66	11,8
Контрольная нагрузка, кг	3,3	5,0	6,8	8,70	10,6

Приложение контрольной нагрузки позволило дополнительно убедиться в нагрузочной способности соединений и достоверности заданных уровней натягов для последующих исследований термостойкости.

Для рациональной организации исследования термостойкости конического соединения деталей из пары материалов «техническая керамика – стекло» проведено планирование эксперимента на основе методики [9]. Ввиду нелинейности зависимостей

коэффициентов линейного расширения рассматриваемых материалов от температуры в качестве математической модели, описывающей зависимость температуры распрессовки деталей от величины натяга, с которым они собраны, выбран полином второй степени:

$$Y_1(X) = a_0 + a_1X + a_2X^2, \quad (1)$$

$$Y_2(X) = b_0 + b_1X + b_2X^2, \quad (2)$$

где $Y_1(X)$ – исследуемый параметр – температура распрессовки соединения стеклянного штифта, покрытого тонкой пленкой хрома, с керамическим основанием; $Y_2(X)$ – температура распрессовки соединения стеклянного штифта (без покрытия) с керамическим основанием, X – кодированное значение фактора – величина натяга конического соединения.

Фактор X варьировался на 5 уровнях. Минимальный и максимальный уровни взяты исходя из микрогеометрических параметров сопрягаемых поверхностей, возможностей используемого оборудования и прочности кварцевого стекла. Значения выбранных уровней фактора даны в табл. 4.

Таблица 4. Уровни варьируемого фактора

Уровень фактора	Обозначение кодовое	Натяг Δd , мкм
		X
Интервал варьирования	Δx	1
Нижний уровень	-2	2
Уровень 1	-1	3
Основной уровень	0	4
Уровень 2	1	5
Верхний уровень	2	6

Для каждого уровня фактора эксперимент проводился дважды. Всего проведено 20 опытов: 10 – для соединений, в которых штифт покрыт тонкой пленкой хрома, и 10 – для соединений, в которых штифт был без покрытия.

После статистической обработки данных методом наименьших квадратов [9] получены регрессионные модели, отражающие зависимости термостойкости конического соединения деталей из пары материалов «техническая керамика – стекло» с хромовым покрытием штифта и без него от натяга:

$$Y_1(X) = 287,7 + 28,8X - 6,3X^2, \quad (3)$$

$$Y_2(X) = 224,9 + 23X + 3,57X^2. \quad (4)$$

Значения t -критерия Стьюдента для полученных коэффициентов регрессий (3) и (4) оказались больше для уровня значимости 0,05 и степени свободы 5. Следовательно, все коэффициенты статистически значимы.

Матрица планирования эксперимента представлена в виде табл. 5.

Значения функций отклика Y_1 и Y_2 в табл. 5 для каждого уровня являются средними арифметическими параллельных опытов, среднеквадратические отклонения составили $S_1 = 8,37$ и $S_2 = 7,07$.

Таблица 5. Матрица планирования

№ опыта	Матрица планирования в кодированных значениях	Функции отклика	
		$T_{распр}$ $Y_1, ^\circ\text{C}$	$T_{распр}$ $Y_2, ^\circ\text{C}$
1	+2	320	280
2	-2	206	195
3	+1	310	265
4	-1	250	205
5	0	290	215

Перепишем регрессионные модели (3) и (4) в истинных значениях фактора:

$$T_{p1} = 72 + 79,1\Delta d - 6,3\Delta d^2, \quad (5)$$

$$T_{p2} = 190 - 5,57\Delta d + 3,57\Delta d^2, \quad (6)$$

где T_{p1} – температура распрессовки соединения стеклянного штифта, покрытого тонкой пленкой хрома, с керамическим основанием, $^\circ\text{C}$; T_{p2} – температура распрессовки соединения стеклянного штифта (без покрытия) с керамическим основанием, $^\circ\text{C}$; Δd – величина натяга конического соединения, мкм.

F -критерий Фишера для (5) и (6) составил $F_1 = 0,087$ и $F_2 = 3,11$ соответственно. Табличное значение $F_{табл} = 5,8$ для уровня значимости 0,05 и степеней свободы $f_1 = 2$ и $f_2 = 5$. Следовательно, полученные модели (5) и (6) адекватно описывают результаты наблюдений.

На рис. 4 изображены кривые зависимости температуры распрессовки от натяга, полученные в результате экспериментов.

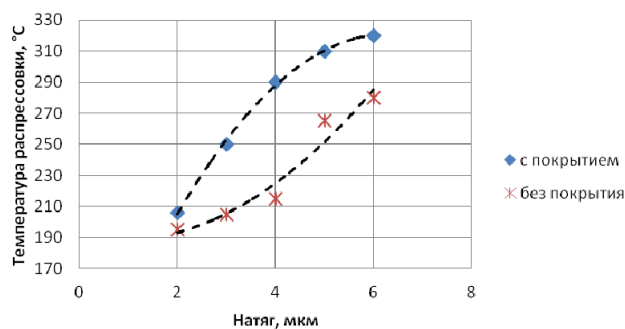


Рис. 4. Зависимости температуры распрессовки от натяга: верхний график – для конического соединения стеклянного штифта, покрытого тонкой пленкой хрома, с керамическим основанием; нижний – для аналогичного соединения со штифтом без покрытия

Из рис. 4 видно, что при величинах натяга 2 мкм и более распрессовка соединений при нагреве происходит при температурах свыше 190 $^\circ\text{C}$. Характер зависимостей нелинейный, что можно объяснить непропорциональностью изменения коэффициента линейного расширения от температуры. Кроме того, соединение с покрытием обладает большей термостойкостью по сравнению с аналогичным соединением без покрытия, что предполагает более сложный механизм контактного взаимодействия при наличии металлического покрытия.

Выводы

1. Исследование НС, проводимое на основе математического планирования эксперимента, позволило получить зависимости термостойкости от натяга для конических соединений деталей из пары материалов «техническая керамика – стекло», в том числе с промежуточным тонким токопроводящим слоем. Представленная проверка полученных моделей по F -критерию Фишера для уровня значимости 0,05 показала их адекватность результатам наблюдений.

2. Планирование эксперимента позволило получить адекватные регрессионные модели термостойкости конических соединений деталей из пары материалов «техническая керамика – стекло» с хромовым покрытием и без него при минимальном количестве опытных образцов – 6 комплектов.

3. Полученные зависимости имеют нелинейный характер, что говорит о сложном влиянии температуры на геометрические параметры сопрягаемых деталей, коэффициент линейного расширения их материалов, а также механику контактного взаимодействия рассматриваемых соединений, в том числе с хромовым покрытием.

Библиографические ссылки

1. Гаффанов Р. Ф., Щенятский А. В. Математическое моделирование термической сборки с натягом // Интеллектуальные системы в производстве. – 2008. – № 2. – С. 55–59.

2. Фатмиев Ф. Ф. Разработка методов повышения нагрузочной способности и расчета конических соединений : дис. ... канд. техн. наук. Специальность: 01.02.06. Устинов, 1985. – 136 с.

3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / пер. с англ. под ред. Б. Е. Победри. – М. : Мир, 1975. – 541 с. : ил.

4. Газизов Х. Ш., Кузьминых А. А. Расчет соединений с натягом методом конечных элементов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1994. – № 7–9. – С. 58–61.

5. Щенятский А. В., Чухланцев Е. С. Исследование нагрузочной способности поликонтактного неравножесткого соединения с натягом численными методами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1 (21). – С. 167–170.

6. Атопов В. И., Сердобинцев Ю. П., Славин О. К. Моделирование контактных напряжений. – М. : Машиностроение, 1988. – 270 с.

7. Антипов Ю. А. Контактные задачи теории упругости при наличии сцепления и сухого трения : автореф. ... д-ра техн. наук: 01.02.04. – М., 1993. – 27 с.

8. Таблица коэффициентов трения покоя (коэффициентов сцепления) для различных пар материалов (большая). DPVA.info – Инженерный справочник [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication/StartFriction1/>, свободный. – Загл. с экрана.

9. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 280 с.

10. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 1958. – 336 с.

I. V. Abramov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
P. V. Lekomtsev, Senior Lecturer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Experimental studies of the thermal stability of the tapered interference fit of parts made from glass and ceramics

The article presents a study of the effect of temperature on the strength of the tapered interference fit of parts made from glass and ceramics. As a result of experimental design, the regression models have been obtained, reflecting the dependence of the thermal stability of the interference for considered compounds, including the intermediate thin conductive layer.

Keywords: tapered interference fit, thermal stability, mathematical design of experiments, regression analysis, thermal expansion coefficient, technical ceramics, glass.

Получено: 6.11.14

УДК 624.131

В. П. Баранчик, доктор технических наук, профессор

М. Ф. Закиров, кандидат технических наук, доцент

К. А. Иванов, магистрант

Н. А. Кибардина, магистрант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНОГО ГРУНТА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ МАШИН

Представлены результаты применения метода дискретных элементов для оценки механических характеристик песчаного грунта при циклическом нагружении. В основу положено сравнение результатов численных экспериментов и результатов лабораторных испытаний, проведенных в Казанском государственном архитектурно-строительном университете. Разработана математическая модель, адекватно отражающая изменение прочностных и деформационных показателей песчаных грунтов при циклическом объемном сжатии. Математическая модель позволяет определять оптимальные параметры и число циклов воздействия рабочего органа машины, при которых обеспечивается отсутствие просадки земляного сооружения заданных размеров.

Ключевые слова: уплотнение грунта, главные напряжения, боковые давления, относительная деформация, модуль деформаций, циклическая прочность, число циклов нагружения, предельная нагрузка, предел прочности, метод дискретных частиц, численные эксперименты, внутренняя энергия системы, энергоёмкость процесса уплотнения грунта.