

### Литература

1. Отливки из металла и сплавов. Допуски литых размеров, масс и припусков на обработку. ГОСТ 26645-85.
2. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства: в 2-х томах – Л.,: Машиностроение, 1985. – 405 с.
3. Маталин А.А. Технология машиностроения. – Л.,: Машиностроение, 1985. – 496 с.
4. Цветков В.Д. Система автоматизации проектирования технологических процессов. – М.,: Машиностроение, 1972. – 240 с.
5. Корчак С.Н. и др. Система автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов. – М.,: Машиностроение, 1988. – 349 с.
6. Кузнецов А.М., Клепиков В.В. Современные методы расчёта припусков. – М.,: Машиностроение, 1988. – 65 с.
7. Фираго В.П. Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей. – М.,: Оборонгиз, 1963. – 531 с.

### **Интеллектуальные материалы на основе керамических композитов**

д.т.н. проф. Максимов Ю.В., к.т.н. доц. Мерзликин В.Г., к.ф.-м.н. доц. Сидоров О.В.,  
к.т.н. с.н.с. Суттугин В.Г.

*МГТУ «МАМИ», ФГУП ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга  
8(495) 223-05-23, доб. 1353*

*Ключевые слова:* композиты, сегнетокерамика, интеллектуальные материалы.

Обширные исследования по созданию распределенных систем приема, обработки акустической информации и управления динамическими и движущимися объектами, как правило, опираются в конкретные технические средства, имеющиеся на сегодняшний день в мировой практике. Поэтому в настоящее время основные исследования ведутся по моделированию распределенных систем, в которых датчики и актюаторы представляют собой отдельные, разнесенные в пространстве или компонованные на жестком основании элементы, интегрированные в конструкционные материалы. Помимо этого ведутся работы по созданию и моделированию систем на основе композитов с жесткой матрицей и различными формами однородного заполнения. В последние годы предприняты попытки по созданию единых распределенных систем с интегрированными в эластичную пленочную основу датчиками. Это стало возможным благодаря удачному сочетанию термостойких, высокопрочных и эластичных свойств полигетероариленов и высоких пьезоэлектрических свойств порошковых сегнетоэлектриков. Создание на их основе реальных распределенных пленочных датчиков привело к необходимости математического моделирования процессов получения и обработки сигналов для систем ранней диагностики и предупреждения. Используемые за рубежом и у нас в стране пленочные компоненты на основе поливинилиденфторида работают лишь до 150°C и имеют малую прочность. Поэтому моделирование систем с большой прочностью и работающих в области повышенных до 300°C температур представляет большой интерес с теоретической и практической точек зрения (контроль за работой теплоносителя в ядерных энергетических установках, раннее обнаружение наземных, подводных и воздушных объектов в условиях плохой и нулевой видимости).

Основным элементом такого контроля должен стать пленочный сенсорный композиционный материал, преобразующий параметр теплового поля в данной точке в электрический сигнал. В настоящее время известна технология получения пленочных сенсорных композитных пленок, интегрированных в объект, для контроля его акустических и механических параметров, в том числе и на предельных нагрузках. Поэтому в мире разрабатываются различные типы таких функциональных композиционных материалов [1-4], в частности пленок, представленных на рисунке 1. Эти композиционные материалы представляют собой матрицу

на основе неорганических веществ и керамических наполнителей в виде различных включений.

Еще один подход состоит в использовании полимерной матрицы и керамического наполнителя с пьезо- и пироэлектрическими свойствами. Разработка пленок на их основе ведется в ряде лабораторий и научно-исследовательских институтов [1-13].

Известно большое количество материалов, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами. Традиционно используются керамические сегнетоэлектрики, в том числе титанаты свинца, кальция, стронция, титанаты-цирконаты свинца и др. [7]. Они обладают величинами диэлектрической проницаемости до 1100-1500, а их пьезомодуль достигает значения 500 пКл/Н. Однако характерной особенностью керамических материалов является их хрупкость и невозможность получения из них гибких и тонкослойных изделий, в частности чувствительных датчиков различного назначения или других изделий конструкционного назначения.

Из полимерных материалов сегнетосвойствами обладают некоторые термопласты - поливинилхлорид, полиамид 66, полиакрилонитрил, величины пьезомодуля которых укладываются в диапазоне 1,5-4,1 пКл/Н. Наиболее высокое значение пьезомодуля получено на образцах поливинилиденфторида  $\beta$  - формы. В последнее время были разработаны и находят применение гибкие полимерные пленки на основе сополимеров винилиденфторидов и винилиденцианида, обладающие более высокими сегнетосвойствами [8].

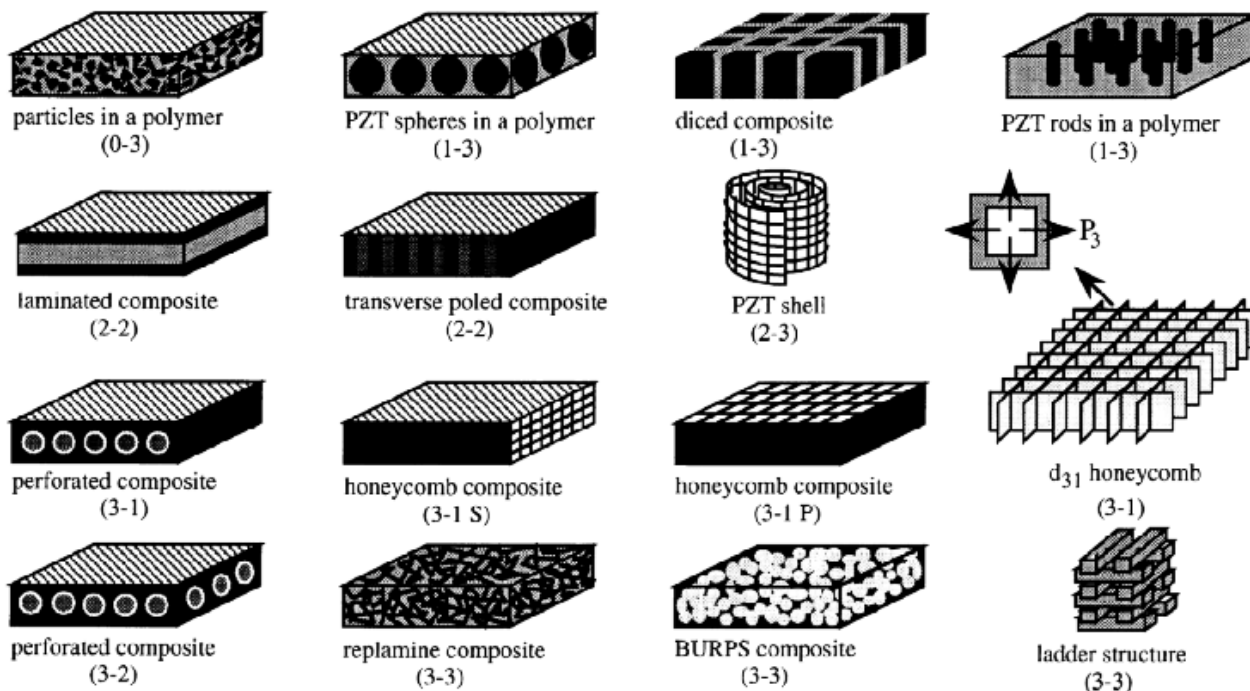


Рисунок 1

Их основным недостатком является низкая температура стеклования, приводящая к исчезновению сегнетосвойств при температуре выше 80°C. Сочетание электрофизических и механических свойств как керамических, так и полимерных материалов неудовлетворительное. Одним из путей получения пьезоэлектрических материалов, сочетающих высокие сегнетосвойства сегнетокерамики и высокую технологичность полимеров, является создание сегнетополимерных композиционных материалов. Известны пьезополимерные композиты на основе пьезокерамики и различных полимеров, таких как алифатические полиамиды и полиэфирсы, полиолефины, полиуретаны, каучуки, а также эпоксидные смолы [9]. Содержание керамики в таких композитах обычно не превышает 40-60 %об. Из наполненных композитов различными способами получают пленочные материалы, обладающие сегнетоэлектрическими свойствами. Они могут применяться в различных областях радиотехники, электроники и

акустики. В частности, известна композиция на основе 60 %об титаната свинца и эпоксидной смолы, из которой методом горячего прессования получают плоские образцы толщиной 2 мм. [10]. Эти листовые сегнетоматериалы достаточно хрупкие, что не позволяет получать тонкие пленки.

Для получения более гибких сегнетоэлектрических композиционных материалов предложено в качестве полимерной матрицы использовать фторкаучук и другие эластичные матрицы [11-13]. Однако температурная область эксплуатации данных композиционных пьезополимерных материалов ограничена температурой стеклования полимерной матрицы, то есть не выше 120-150°C, что резко ограничивает как параметры получения, так и области применения изделий, выполненных из него. Кроме того, такие композиционные материалы имеют недостаточно высокие механические характеристики. Такой, в частности, является сегнетополимерная композиция, содержащая порошковую сегнетокерамику (PZT) и поливинилиденфторид (ПВДФ) в качестве полимерной матрицы. Содержание пьезокерамики составляет 10—60 %об, полимерной матрицы 90-40 %об и не более 3 %об углеродного порошка [6], диапазон рабочих температур довольно низкий и ограничен температурой стеклования полимерной матрицы, т.е. не выше 100-120°C. Кроме того, изделия, выполненные из этой полимерной композиции, имеют недостаточно высокие механические и пьезоэлектрические свойства. Все это ограничивает область применения изделий, выполненных из неё.

С целью создания сегнетополимерной композиции с повышенной температурой стеклования полимерной матрицы и пленок на ее основе, обладающих повышенной рабочей температурой до 250-300°C, повышенными сегнето- и механическими свойствами в широком диапазоне рабочих частот задачи была рассчитана сегнетополимерная композиция, содержащая порошкообразную сегнетокерамику и полимер. В качестве сегнетокерамики использовалась сегнетоэлектрическая керамика с размером частиц 5-10 мкм типа титанат-цирконат свинца, титанат свинца и др.

Полученная пленка имеет прочность 180 МПа, удлинение 15% и величину пьезомодуля 20 пКл/Н. Пьезоэлектрические свойства сохраняются при температуре до 180°C в течение длительного времени. Из этой наполненной арамидной пленки изготавливают чувствительные элементы для пьезодатчика.

Чувствительные элементы представляют собой сложенную пьезопленку с четным числом слоев и имеют следующие размеры: длина - 15 мм, ширина - 12 мм, толщина - 0,1 мм (вместе с защитной оболочкой). Емкость элементов составляет около 1000 пФ,  $\text{tg } \delta = 0,02$ . Элемент характеризуется высокой чувствительностью в широком диапазоне частот. Электрический сигнал с пьезодатчика снимается посредством коаксиального кабеля, экран которого соединен с электродом, выходящим на внешнюю поверхность чувствительного элемента, а сигнальная жила с внутренним электродом.

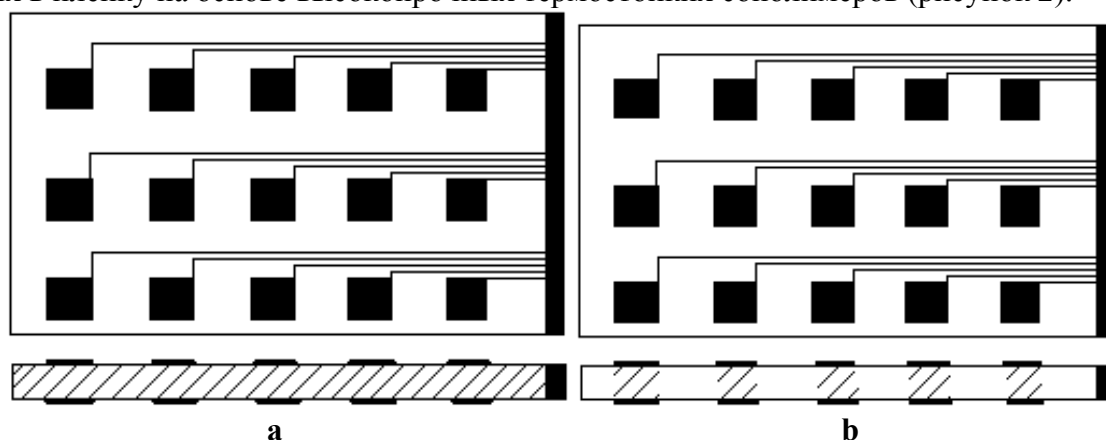
Сегнетоэффект в полученных композитах проявляется при наполнении свыше 17,4%, причем с увеличением объемной доли наполнителя до 26,8% в полимерной композиции сегнетомодуль увеличивается от 0,2 до 60 пКл/Н, но прочность и деформативность снижаются. Образцы сегнетоконкомпозитов с наполнением ЦТС-19 в количестве 22-24% характеризуются оптимальным соотношением сегнетосвойств и механических показателей.

Данный материал обладает следующими свойствами:

- низкой плотностью;
- высокой деформативностью и гибкостью, что важно при изготовлении изделий;
- простотой изготовления пленок и других видов полуфабрикатов (волокон, пластин и др.);
- высокой термочувствительностью.

Промышленные сегнетоэлементы являются узкочастотными и могут принимать сигналы только в достаточно высоком диапазоне частот  $\Delta f = 0,02 - 2$  МГц, причем для этого необходим набор сегнетоэлементов из керамики. В результате были получены композиционные материалы в виде гибких высокопрочных термостойких пленок, на основании которых мож-

но создавать интеллектуальные высокопрочные композиционные материалы и конструкции. Они представляют собой однородные композиционные пленки с нанесенной конфигурацией преобразователей по типу печатных плат или совокупность отдельных сенсоров, интегрированных в пленку на основе высокопрочных термостойких сополимеров (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Пленочные композиционные пьезопреобразователи:**  
**a** - однородная пьезокомпозиционная пленка;  
**b** – полимерная пленка с включением композита

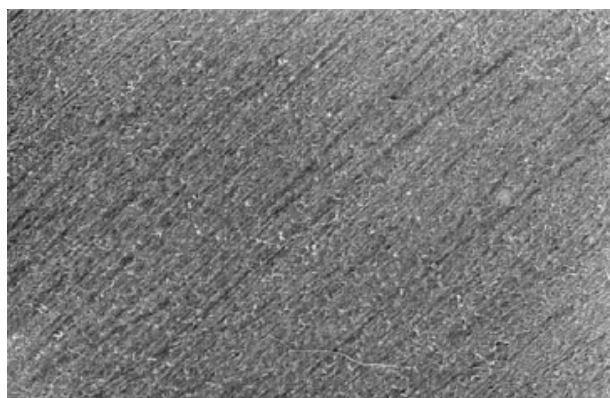
Обладая пьезомодулем, по порядку величины сравнимым с модулем пьезокерамики, а диэлектрической проницаемостью на порядок ниже, такие преобразователи имеют более высокую пьезочувствительность, т.е. значение электрического напряжения при действии единицы механической нагрузки, что позволяет использовать ПКП в качестве более чувствительных приемников. Возможность изготовления ПКП большой площади и любой формы, высокая механическая прочность и высокая термостойкость, т.е. сохранение механических и пирозлектрических параметров при повышении температуры до  $150^{\circ}\text{C}$ , делают их незаменимыми для контроля за объемными конструкциями и поверхностями сложной формы. В отличие от чисто полимерных пленок на основе ПВДФ, которые текут при повышенных давлениях и температурах выше  $80^{\circ}\text{C}$  и теряют при этом пьезосвойства, что приводит к выходу из строя датчиков на их основе, в ПКП практически отсутствуют необратимые деформации, что обеспечивает стабильность параметров в процессе эксплуатации.

Как известно, механические и диэлектрические свойства твердых сополимеров на основе большинства гетероароматических сополимеров сильно зависят от ориентации макромолекул в растворе при осаждении. Так, механическая прочность высокоориентированных и неориентированных волокон из таких сополимеров различается на порядок, а диэлектрическая проницаемость - почти в два раза.

Аналогичные явления наблюдаются и в полимерных пьезоэлектриках – в поливинилиденфториде при шестикратной ориентационной вытяжке пьезомодуль увеличивается почти в 8 раз. На основе этих данных был разработан метод получения композитной пленки осаждением из анизотропного раствора с выделенной ориентацией макромолекул, лежащих в плоскости пленки. Предориентация макромолекул в растворе перед осаждением осуществлялась за счет сдвига. В процессе осаждения, занимающего время порядка минуты, прилагались двойные сдвиговые напряжения из-за значительной вязкости раствора, что в конечном итоге не давало существенной разориентации. Микрофотография полученной пьезокомпозиционной пленки представлена на рисунке 3. На ней видна фибриллизованная структура пленки с ориентацией по диагонали. Процесс осаждения и образования ориентированной структуры изучался методом рентгеновской диффрактометрии.

Исследование поверхности и сечения пленок методом электронной микроскопии показывает, что наполнитель представляет собой частицы разнообразной формы, размеры которых колеблются от десятых долей микрона до нескольких микрон. Частицы имеют форму

эллипсоидов вращения, параллелепипедов и различных многогранников с острыми углами между гранями. Наблюдаются также конгломераты частиц в виде спеков, внутри которых имеются пустоты.



**Рисунок 3 – Ориентированная пьезокompозитная пленка**

При исследовании диэлектрических свойств пленок композиционных материалов [15] были получены следующие данные:

*Таблица 1*

Образец	Содержание порошка НЦТС-1, % об.	Толщина образца, мкм	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$		Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$
			теор.	экспер.	
НЦТС-1		740	-	8.9	0.018
Полимер	0	18	2848	8.9	0.043
Полимер	21	13	-	43.0	0.026
Полимер	58	32	6.0	17.5	0.013

Из таблицы 1 видно, что теоретическое значение диэлектрической проницаемости для пленки Полимер + 58% об наполнения НЦТС-1 значительно меньше, наблюдаемого экспериментально, что может быть следствием более низкого, чем предполагалось, реального содержания наполнителя в пленке. С другой стороны, количество наполнителя в композите, определенное методом сжигания, также оказалось меньше ожидаемого. Так, при сжигании пленки композита 58% об наполнения эта величина стала равна 52%. Для уточнения процентного содержания наполнителя в композитах были сняты инфракрасные (ИК) спектры для пленок чистого полимера, пленок двух композитов различного процентного наполнения (Полимер +21% об и Полимер +58% об) и самого наполнителя, запрессованного с КВг. ИК спектры композитов имеют ярко выраженную частоту поглощения  $603 \text{ см}^{-1}$ , которая отсутствует в спектре чистого полимера. Интенсивность этой полосы возрастает с увеличением процентного содержания наполнителя. Эту частоту следует отнести к валентным колебаниям оксидной группы НЦТС-1.

Отсутствие новых частот поглощения в ИК спектрах композитов по сравнению с ИК спектрами самого полимера и наполнителя позволяет говорить, что между полимером и наполнителем не происходит химических взаимодействий друг с другом.

Для анализа данных ИК спектроскопии исследуемых пленок из композита используем модель двухслойной структуры, предложенную в работе [16]. Для оценки толщин полимерной прослойки и слоя пьезокерамического порошка используем формулу для относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  композита, предложенную в [16]:

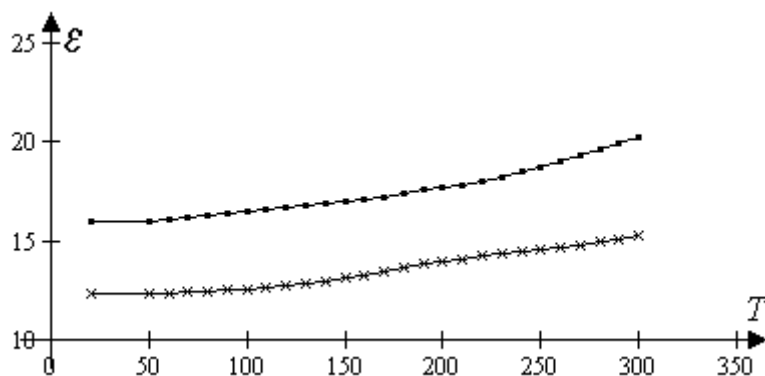
$$\epsilon = (\epsilon_1 \epsilon_2 (1 + d_2 / d_1)) / (\epsilon_1 (d_1 / d_2) + \epsilon_2),$$

где:  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – относительные диэлектрические проницаемости полимера и сегнетокерамического наполнителя соответственно;

$d_1$  и  $d_2$  – толщина слоев полимерной матрицы и наполнителя соответственно.

По полученным значениям толщин слоев, используя данные ИК спектров и закон поглощения Буггера, были рассчитаны концентрации сегнетокерамического порошка в пленке. Для этого анализа концентрации наполнителя в композите была выбрана полоса поглощения в области  $1325 \text{ см}^{-1}$ , интенсивность которой существенно изменяется с изменением концентрации полимера в композите. Результаты расчетов показали, что для композита Полимер +21% об наполнения толщина полимерной прослойки и сегнетокерамического порошка составили 3.5 мкм и 9.5 мкм соответственно, что отвечает концентрации наполнителя в пленке 17% об. Для композита Полимер +58% об наполнения толщина полимерной прослойки и сегнетокерамического порошка составили соответственно 11.3 мкм и 20.7 мкм, что отвечает концентрации наполнителя 52% об, что совпало со значением, полученным при сжигании. Полученные концентрации наполнителя в исследованных пленках несколько меньше приведенных ранее значений 21% об и 58% об.

После осаждения и термообработки на пленку напылялись алюминиевые электроды и изучалась зависимость диэлектрической проницаемости от температуры (рисунок 4). Так как тензор диэлектрической проницаемости сополимера связан с ориентацией макромолекул, то диэлектрическая проницаемость перпендикулярно поверхности пленки будет минимальной, что ясно видно из сравнения графиков на рисунке 4, где нижняя кривая описывает зависимость  $\varepsilon$  от температуры  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) для ориентированной пленки с 60%об наполнением, а верхняя – для неориентированной с тем же наполнением.



**Рисунок 4 - Зависимость диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  от температуры для ориентированной и неориентированной пленок**

Проводящие электроды – неотъемлемая часть любого пьезоэлектрического элемента преобразователя. В общем случае они представляют собой слой металла, наносимый на поверхность пьезоэлектрической композитной полимерной пленки.

На практике нанесенные электроды являются источником ряда затруднений, в частности тогда, когда необходимы очень хорошо воспроизводимые и оптимальные свойства керамических элементов. В идеальном случае металлический слой должен прочно сцепляться с поверхностью пленки, он должен быть очень тонким, иметь практически нулевое электрическое сопротивление и высокую стойкость к химическим и физическим воздействиям. Кроме того, должна быть обеспечена возможность такой пайки выводов к металлу, чтобы спай имел большую прочность при растяжении и хорошую надежность. На практике эти идеальные свойства получить не всегда возможно.

Сцепление электродов с пленкой особенно важно. Если имеется какая-либо потеря прочности сцепления, то зазор между электродом и пленкой с высокой  $\varepsilon$  действует как последовательно включенная емкость малой величины. Присутствующий в зазоре воздух очень сильно понижает эффективную емкость пленочного элемента преобразователя. При прило-

жении электрического поля наибольшее падение напряжения происходит в указанном зазоре. Это мешает поляризации, если зазор возник до осуществления этой стадии. При последующем использовании пленочного элемента он ухудшает эффективность работы преобразователя. В худшем случае металл электродов может даже отслоиться от пленки, что приводит ее в полную негодность. Для возбуждения механических перемещений во многих случаях к пьезоэлектрическим преобразователям прикладывается высокое электрическое напряжение большой мощности. В этих условиях дефектное сцепление электродов с пленкой проявляется довольно быстро.

В результате экспериментального исследования различных металлических покрытий наиболее оптимальным покрытием был выбран напыленный в вакууме алюминиевый слой.

На основе пленочного композиционного материала разработаны пленочные сенсоры с различными видами напыленных электродов, в частности с нанесенными встречноштырьевыми преобразователями (ВШП).

На основе пленочных композиционных материалов были изготовлены образцы конструкционного материала с интеллектуальными свойствами. Пример такого материала показан на рисунке 5. Здесь 1 – дискретные пьезополимерные сенсоры с ВШП, 2 – интегрированные в материал пленочные сенсоры в виде распределенной системы с прямоугольными преобразователями и ВШП.

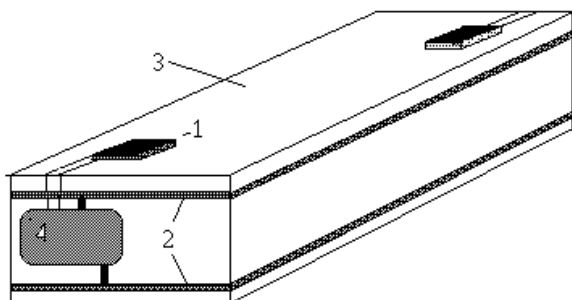


Рисунок 5

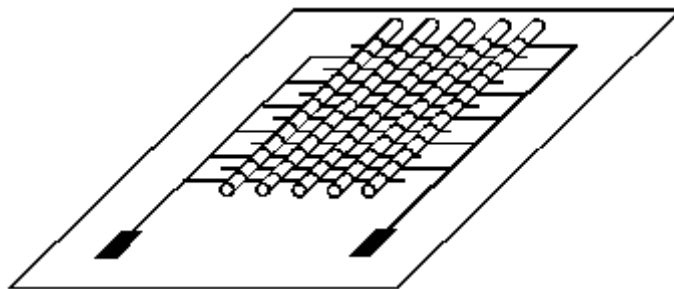


Рисунок 6

Актуаторами для такого материала служили конструкции в виде волоконистого материала из пьезополимерных волокон с нанесенными на их поверхность ВШП (рисунок 6).

#### Литература

1. Sporn D., Schoenecker A. Composites with piezoelectric thin fibers – first evidence of piezoelectric behavior // *Mat Res Innovat* (1999) 2: 303–308.
2. Tressler a J.F., Alkoy a S., Dogan b A., Newnham R.E. Functional composites for sensors, actuators and transducers // *Composites: Part A* 30 (1999) 477–482.
3. Qing-qi Zhang, Helen Lai-wa, Chan Qifa Zhou, Chung-loong Choy PCLT/P(VDF-TrFE) 0–3 nanocomposite thin films for pyroelectric applications *Mat Res Innovat* (1999) 2: 283–288.
4. Chen Y, Chan HLW, Choy CL (1996) Proc. 10 th IEEE Intl. Symp. Application of Ferroelectrics (ISAF'96) vol. II IEEE, New York, pp 619–622.
5. Chen Y, Chan HLW, Choy CL (1998) *J Korean Phys Soc* 32: S1072.
6. Gururaja TR, Safari A, Newnham RE, Cross LE (1987) Piezoelectric ceramic-polymer composites for transducer applications, chap 2.3, In: Levinson LM (ed) *Electronic ceramics*. Marcel Dekker, NY.
7. Физический энциклопедический словарь - М.: Советская энциклопедия. 1965, Т. 4, с. 251.
8. Лесных О.Д., Артемьев В.А., Шерман М.Я. и др. Получение пьезопленок. Свойства и применение. - М.: НИИТЭХим, Обз. инф. Сер. Полимеризационные пластмассы. 1989, 35с.
9. Лучейкин Г.А. Полимерные пьезоэлектрики - М.: Химия, 1990, с. 176.
10. Патент США № 4874727, C04B 35/00, 1990.
11. Патент США № 5505870 C04B 35/46 1998.
12. Ting R.Y. A review on the development of piezoelectric composites for underwater acoustic ap-

- plications // IEEE Trans Instrum Meas 1992; 41: 64.
13. Newnham RE, Fernandez JF, Markowski KA, Fielding JT, Dogan A, Wallis J. Composite piezoelectric sensors and actuators // Mater Res Soc Proc 1995; 360: 33.
14. Sidorov O.V., Schetinin A.M., Frenkel G.G. New Sensor Composites based on aromatic polyamide // Thesis of 13TH international conference on composite materials, Beijing China, June 25 – 29, 2001.
15. Сидоров О.В. Ориентационное упорядочение в композитной пленке в процессе осаждения из раствора // Международный симпозиум ОМА-2003, г. Ростов, ИФ РГГУ, 2003.
16. Платонова И.В., Сидоров О.В., Тараскин С.А. Пьезоэлектрические свойства пленок полимерных композитов с сегнетоэлектрическим наполнителем // Сб. трудов 7-го международного симпозиума ОДРО-2004 - Ростов н/Д: ИФ РГГУ, 2004, с. 61-62.

### **К вопросу об особенностях проектирования и моделирования сварных конструкций корпусных деталей станков**

к.т.н. проф. Михайлов В.А., Порхунов С.Г.  
МГТУ «МАМИ»  
+7-495-223-05-23 доб. 1327

*Ключевые слова:* корпусные детали, сварные конструкции, метод конечных суперэлементов, виброустойчивость, деформация.

Корпусные детали в станках являются наиболее сложными по своей конфигурации, трудоемкими при изготовлении. Поэтому основная задача заключается в разработке метода определения показателей статического и динамического качества корпусных деталей с учетом сварных соединений.

По сравнению с другими типами неразъемных соединений сварные соединения в настоящее время являются наиболее распространенными в современных условиях производства станков - это объясняется тем, что они наиболее технологичные и экономичные. Традиционные методы расчета и проектирования сварного соединения зависят от типа соединения, способа сварки и вида шва [6]. Кроме общих предположений, характерных для расчета напряженно-деформированного состояния, при построении моделей сварных соединений для выполнения приближенных инженерных расчетов делаются некоторые дополнительные допущения, свойственные именно этому типу соединений: свариваемые детали и швы являются деформируемыми; не учитываются концентрации напряжений, наличие которых характерно для мест резкого изменения формы, а расчет выполняется только по номинальным напряжениям; материал шва считается однородным и изотропным; деформации считаются малыми и пропорциональными напряжениям.

Таким образом, решение поставленной задачи является достаточно сложным и требует серьезных исследований.

В качестве основного метода для определения статических и динамических показателей качества конструкции выбран метод конечных элементов в форме метода суперэлементов [5].

Рассмотрим алгоритм метода суперэлементов. Пусть рассчитываемая конструкция разделена на несколько частей - подструктур, каждая из которых в свою очередь состоит из базисных конечных элементов. Условия равновесия подструктуры выражаются системой алгебраических уравнений:

$$[\bar{K}]\{\bar{q}\} = \{\bar{P}\},$$

где:  $[\bar{K}]$  - общая матрица жесткости подструктуры;

$\{\bar{q}\}$  - вектор узловых перемещений;

$\{\bar{P}\}$  - вектор узловых усилий, действующих на подструктуру.