

УДК: 539.3

## **Сравнительная характеристика прочностных свойств образцов с различными типами покрытий для изделий авиационной техники**

Д.Г. Гаврилов, С.В. Мамонов, М.И. Мартиросов, Л.Н. Рабинский

### **Аннотация**

Анализируются результаты экспериментальных исследований по растяжению стальных образцов без покрытия и с нанесенными на них защитными покрытиями различных типов, а также аналогичные исследования по четырехточечному изгибу.

### **Ключевые слова**

покрытия, эксперимент, диаграмма растяжения, механические свойства, порошковые краски, лаки, правило смесей, слоистые покрытия

### **Введение**

В настоящее время практически на все элементы машиностроительных конструкций из металлов наносятся различные покрытия. Это обусловлено хорошими защитными антикоррозионными характеристиками большинства покрытий, а также их декоративными свойствами. Такое сочетание металлической основы и самого покрытия обеспечивает конструкции в целом прочность и необходимые функциональные свойства. Наиболее широкое применение различных типов покрытий нашло там, где конструкции подвержены сильному влиянию внешней среды, коррозионных факторов, агрессивных воздействий различного характера. А это присуще таким отраслям промышленности как авиационная, судостроительная, автомобильная и другим [1].

Рекомендации по выбору различных типов покрытий, в основном, индивидуальны для каждой отрасли промышленности в отдельности и зависят от условий эксплуатации самих конструкций. Такие особенности нарабатаны со временем и опытом конструирования. Основной целью при выборе покрытия в таком случае является защита материала конструкции. Однако для некоторых отраслей, например, аэрокосмической, к этой цели добавляется еще и прочность, а также снижение веса конструкции. В связи с чем, необходимо учитывать влияние покрытия на прочностные характеристики и массу конструкции, а также изменение механических свойств металлов при проведении термообработки в технологическом процессе нанесения покрытия.

В настоящей работе проводятся экспериментальные исследования механических характеристик стальных образцов без покрытия и с нанесенными на них полимерными покрытиями различных типов (краски, лаки).

### **Постановка задачи**

В качестве объекта исследования выбраны стальные образцы (сталь прокатная листовая 08 ПС) с нанесенными на них порошковой полимерной краской и различными лаками. Использовалась краска фирмы Europolveri (Италия) на эпоксидно-полиэфирной основе, а также современные защитные лаки. Перед нанесением лакокрасочных покрытий на исследуемые образцы проводилась предварительная подготовка поверхностей: обезжиривание (удаление с поверхности органических загрязнений) и фосфатирование (для улучшения адгезии покрытий и замедления распространения подпленочной коррозии).

Введем следующую маркировку покрытий:

- *Покрытие №1.* Краска черная (RAL 9005) порошковая (глянцевая) + «жесткий» полиуретановый лак;

- *Покрытие №2.* Краска черная (RAL 9005) порошковая (глянцевая) + декоративный лак с блестками, нанесенный по технологии Glitter;

- *Покрытие №3.* Краска черная (RAL 9005) порошковая (глянцевая) без лака.

- *Покрытие №4.* Краска черная (RAL9005) порошковая (глянцевая) + прозрачный керамический наноструктурированный лак Ceramiclear Deltron D8105 фирмы PPG Industries (США).

Нанесение покрытий проводилось в камере Gema (Швейцария) электростатическим распылением. Толщина покрытий контролировалась электронным толщиномером QuaNix 7500 (Германия), предназначенным для измерения толщины покрытия на ферромагнитных и неферромагнитных поверхностях.

Целью работы является сравнение механических характеристик стальных образцов с различными покрытиями.

Образцы представляли собой прямоугольные пластины 12 мм x 120 мм и толщиной 1,5 мм, (см. Рис. 1). Испытания проводились на универсальной испытательной машине серии ZWICK Z100 (Германия), предназначенной для измерений силы, перемещения траверсы и деформаций при испытании металлов, пластмасс, резины, дерева и других материалов на растяжение, сжатие и изгиб и др. Проведение экспериментов на указанной машине возможно с помощью использования программы “TestXpert” с набором определенных прикладных подпрограмм для проведения различных типов испытаний (растяжение, сжатие, изгиб, ползучесть, высокотемпературное нагружение и др.).

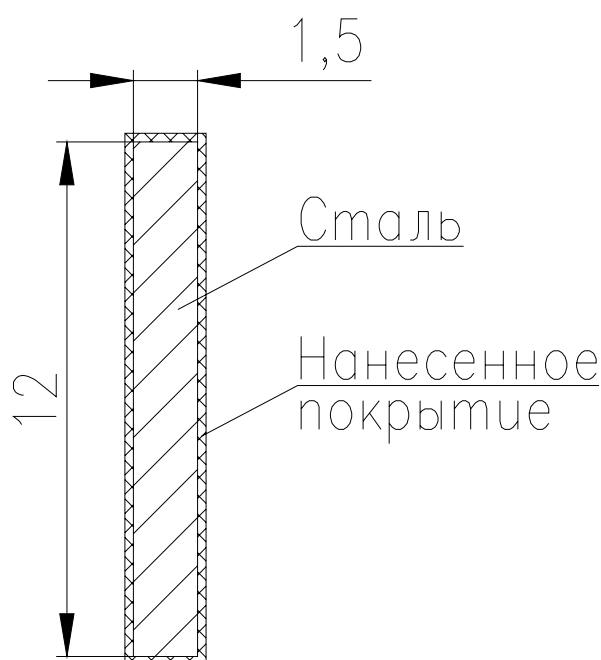


Рис. 1. Поперечное сечение испытуемых образцов.

Испытательная машина имеет следующие технические данные:

Максимальная нагрузка	100 кН
Ширина рабочего пространства	640 мм
Высота нижнего рабочего пространства без оснастки	1360 мм
Скорость перемещения траверсы	0,0005 – 200 мм/мин
Точность установок скорости	0,003 % от $V_{ном}$
Разрешение перемещения траверсы	0,0206 мкм
Точность повторного позиционирования	< 1,0 мкм
Максимальная частота испытания	0,5 Гц

Машина укомплектована двумя динамометрами на 10 кН и 100 кН, которые имеют следующие технические данные:

Номинальное усилие $F_{\text{НОМ}}$	10 кН и 100 кН
Максимальная прилагаемая сила	150 % от $F_{\text{НОМ}}$
Предельная нагрузка	150 % от $F_{\text{НОМ}}$
Разрушающая нагрузка	>300 % от $F_{\text{НОМ}}$
Начальное значение диапазона измерения	
Класс 1	0,4 % от $F_{\text{НОМ}}$
Класс 0,5	2 % от $F_{\text{НОМ}}$

Для измерения продольной деформации (при комнатной температуре) использовался оптический датчик:

Начальная база прибора	10 – 100 мм
Максимальное перемещение щупов	80 мм
Разрешение	0,3 мкм/импульс
Максимальное усилие со стороны датчика на образец	0,08 Н

Общий вид универсальной машины, на которой проводились эксперименты, приведен на Рис. 2.



Рис. 2. Испытательная машина ZWICK Z100.

Испытательная машина ZWICK Z100 зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под № 20385-00 и допущена к применению в Российской Федерации.

Для каждого образца результатом эксперимента на растяжение являются зависимости деформации от растягивающей силы. Основой образцов являлись стальные пластины одинаковой толщины, но наносимые на них покрытия (порошковая краска и лак) имели различную толщину, поэтому для каждого образца проводились замеры в поперечном сечении, и строилась диаграмма растяжения в координатах растягивающее напряжение-деформация. Такое напряжение принято считать эффективным значением.

Таблица 1

Геометрические характеристики образцов

Тип образца	Образец без покрытия	Образец с покрытием №1	Образец с покрытием №2	Образец с покрытием №3	Образец с покрытием №4
Поперечные размеры образца, мм	12x1,5	12,4x2	12,5x2	12,1x1,7	12,4x1,7
Площадь поперечного сечения образца, *10 <sup>-6</sup> мм <sup>2</sup>	18	24,8	25	20,57	21,08
Площадь поперечного сечения покрытия, *10 <sup>-6</sup> мм <sup>2</sup>	-	6,8	7	2,57	3,08

### Анализ полученных результатов

Результатом обработки экспериментальных данных являются графики зависимости напряжений от деформаций для каждого из изучаемых покрытий, построенные на одном графике для наглядности. Это позволяет сделать выводы о различных прочностных свойствах образцов с покрытиями. Напомним еще раз, что напряжения определялись с учетом площади образца с покрытием, для всех типов покрытия поперечные размеры различны.

На рис. 3 представлен график зависимости напряжений от деформаций для исследуемых образцов. На рис. 4 эти зависимости показаны в упругой зоне.

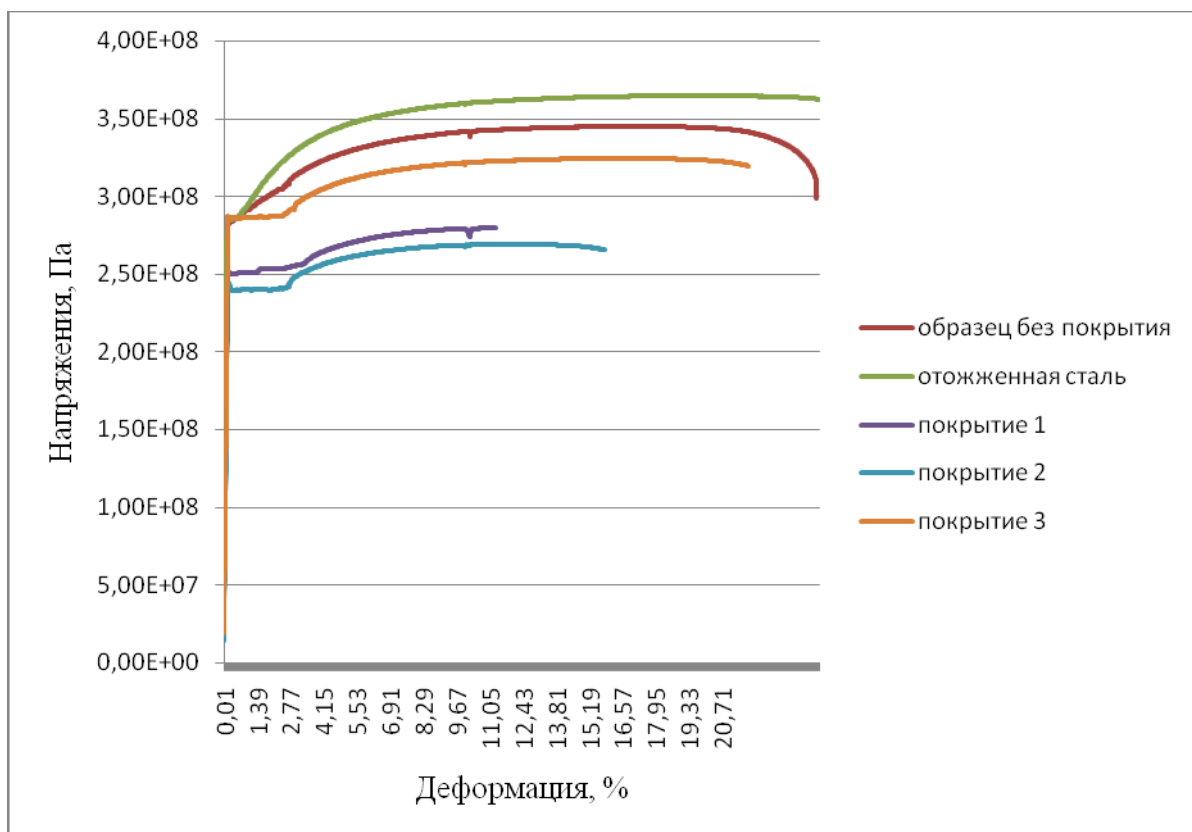


Рис. 3. Графики зависимости напряжений от деформаций.

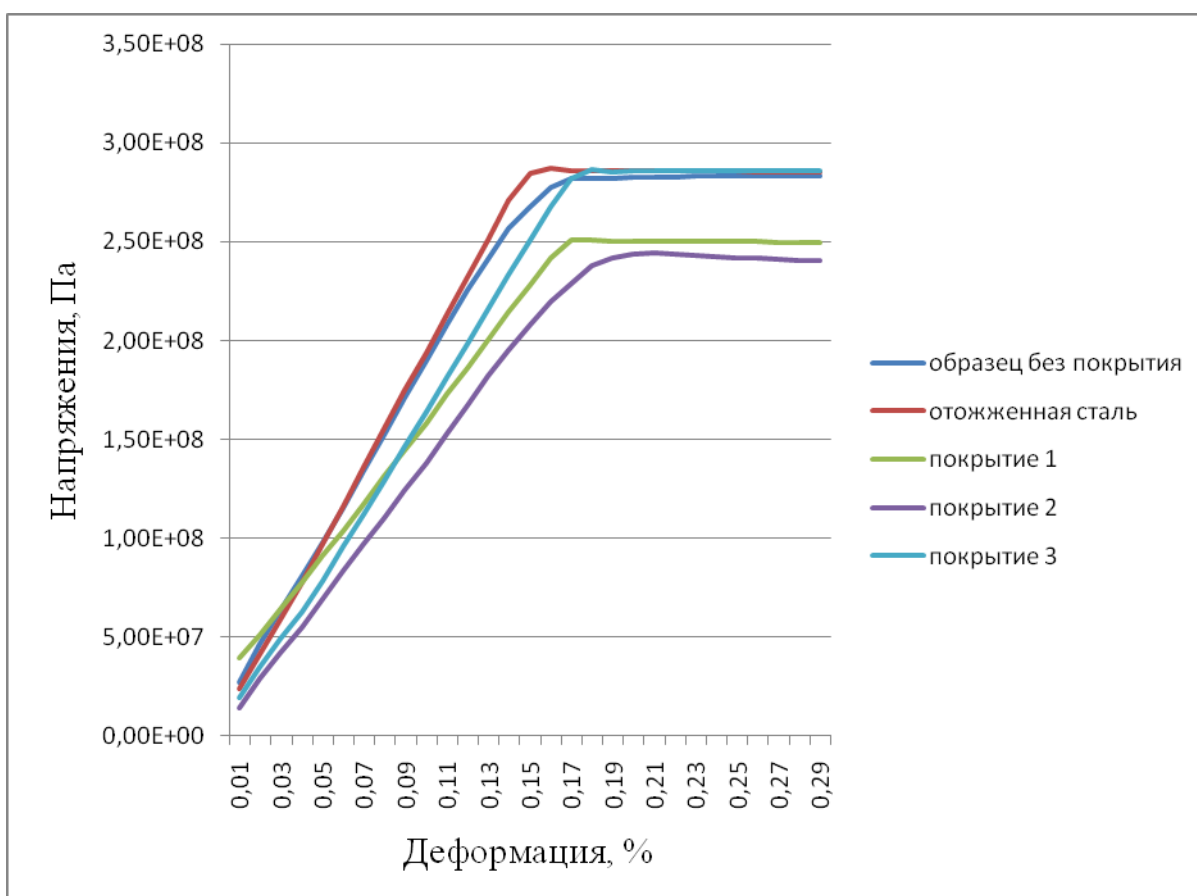


Рис. 4. Графики зависимости напряжений от деформаций в упругой зоне.

Эффективные модули упругости для образцов с различными типами покрытий и модули упругости покрытий определены по правилу смесей [2] (расчет см. далее).

Таблица 2

Модули упругости различных образцов

Тип образца	Образец без покрытия		Образец из отожженной стали		Образец с покрытием №1			Образец с покрытием №2			Образец с покрытием №3				Образец с покрытием №4		
	Образец 1	Образец 2	Образец 1	Образец 2	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Эффективный модуль упругости, *10 <sup>5</sup> МПа	1,9	1,9	2,02	1,85	1,62	2,02	2,02	1,50	1,37	1,40	1,69	1,69	1,69	1,69	1,71	1,71	1,71

Мо- дуль упру- гости покры- тия, опре- делен- ный по прави- лу сме- сей, *10 <sup>5</sup> МПа	-	-	-	-	0,84	0,84	0,84	0,47	0,0007	0,11	0,22	0,22	0,22	0,22	0,6	0,6	0,6
--	---	---	---	---	------	------	------	------	--------	------	------	------	------	------	-----	-----	-----

### Определение модуля упругости с помощью диаграмм растяжения и правила смесей

Правило смесей в большинстве случаев можно представить линейным аддитивным законом [2]. Рассмотрим процесс деформирования образца. При этом будем полагать, что на границах раздела металлической и полимерной фаз указанные фазы идеально связаны. Для определения модуля упругости и предела прочности можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$Y = V_A X_A + V_B X_B; \quad (1)$$

где  $Y$  – физическая величина композита в целом;  $X_A, X_B$  - физические величины фаз, составляющих композит;  $V_A, V_B$  - объемные содержания этих фаз.

В нашем случае объемным содержанием какой-либо фазы может служить отношение площади этой фазы к общей площади образца. В качестве физической величины выступает модуль упругости материала. Таким образом, можно записать следующую формулу:

$$E_{\text{пок}} = \frac{S_{\text{обр}}}{S_{\text{пок}}} E_{\text{обр}} - \frac{S_{\text{ст}}}{S_{\text{пок}}} E_{\text{ст}} \quad , \quad (2)$$

где  $E_{\text{пок}}$  - модуль упругости покрытия;  $S_{\text{обр}}$  - площадь поперечного сечения стального образца с нанесенным на него покрытием;  $S_{\text{пок}}$  - площадь поперечного сечения покрытия;



$E_{обр}$  - эффективный модуль упругости образца;  $S_{ст}$  – площадь стальной подложки;  $E_{ст}$  - модуль упругости стали.

Для образцов с различными типами покрытий также проведено определение твердости по Бринеллю при следующих параметрах: диаметр вдавливаемого шарика – 2,5 мм; сила вдавливания – 187,5 кг. Для каждого образца проведено испытание в семи точках и определено среднее значение твердости [3]. Данные по твердости и статистическим характеристикам [4] проведенного испытания представлены в Таблица 3.

Таблица 3

Значение твердости образцов с покрытиями

Тип образца	Значение твердости для $i$ точки по Бринеллю							Ср. значение	СКО
	1	2	3	4	5	6	7		
Стальной образец	123	124	125	124	125	125	124	124,3	0,8
Образец из отожженной стали	122	123	124	123	123	122	124	123	0,8
Покрытие №1	76	79	78	78	80	79	79	78,4	1,3
Покрытие №2	84	78	85	78	78	78	80	80,1	3,1
Покрытие №3	108	108	98	94	97	97	100	100,3	5,6
Покрытие №4	94	92	89	84	84	86	89	88,3	3,9

### Экспериментальное определение коэффициента Пуассона

На испытуемый образец наклеивались два тензодатчика, измеряющие деформации в продольном и поперечном направлениях. Результаты измерений сведены в Таблица 4.

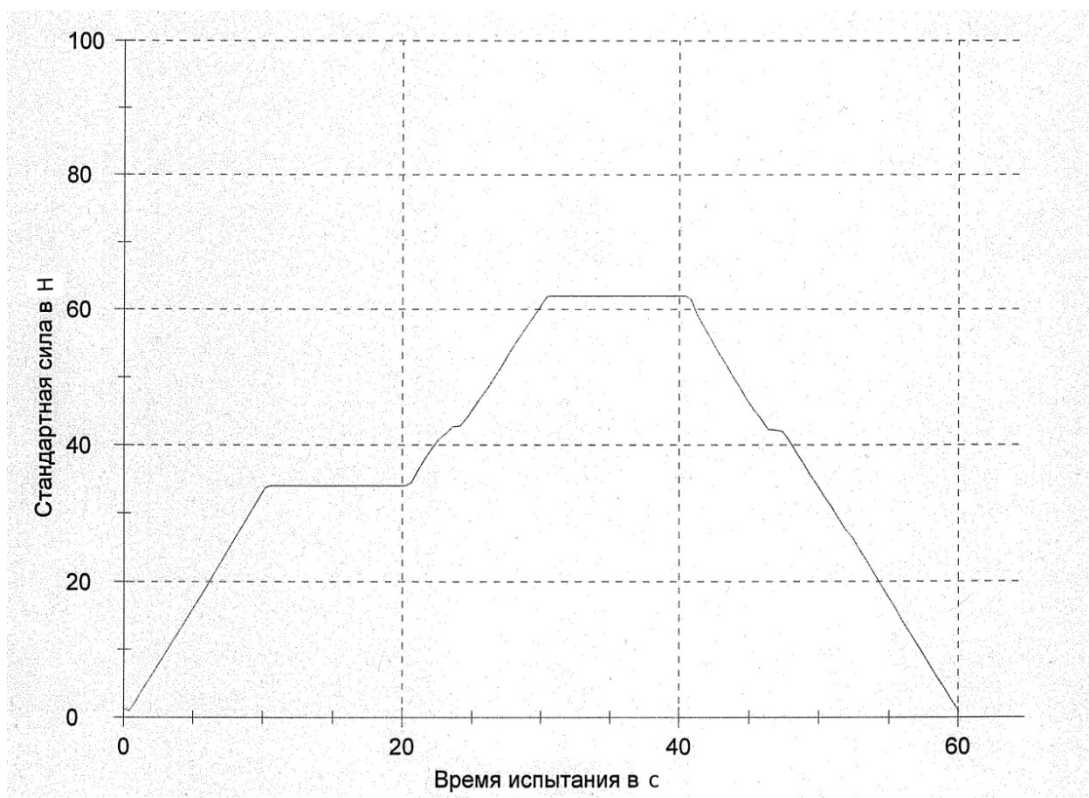


Рис. 5. Изменение силы в процессе испытаний на изгиб (с тензодатчиками для измерения продольной и поперечной деформации).

Средние значения коэффициента Пуассона для образцов с различными типами покрытий, определенного из эксперимента на изгиб, приведены в Таблица 4. Для каждого образца определены два значения коэффициента Пуассона – в сжатой (верхнее значение) и растянутой зоне (нижнее значение).

Таблица 4

Значения коэффициентов Пуассона для различных образцов

Тип образца	Номер образца	Коэффициент Пуассона	Среднее значение коэффициента Пуассона для покрытия	Среднее квадратическое отклонение
Стальной образец	1	0,27	0,268	0,010
		0,26		
	2	0,26		
		0,28		
	3	0,26		
		0,28		
Покрытие №1	1	0,27	0,273	0,005
		0,27		
	2	0,27		
		0,28		
	3	0,27		
		0,28		

Тип образца	Номер образца	Коэффициент Пуассона	Среднее значение коэффициента Пуассона для покрытия	Среднее квадратическое отклонение
Покрытие №2	1	0,27	0,272	0,004
		0,27		
	2	0,27		
		0,27		
	3	0,27		
		0,28		
Покрытие №3	1	0,27	0,273	0,004
		0,27		
	2	0,27		
		0,28		
	3	0,27		
		0,28		
Покрытие №4	1	0,28	0,277	0,005
		0,27		
	2	0,28		
		0,28		
	3	0,27		
		0,28		

### Численное исследование

Математическая модель разработана в среде PATRAN/NASTRAN. С целью упрощения расчетной модели (уменьшения количества элементов в конечно-элементной модели (КЭМ)) при моделировании рассматривается плоское напряженно-деформированное состояние, которое моделируется с помощью плоских (2D) элементов. С этой же целью при моделировании растяжения рассматривается только половина продольного сечения образца, а вторая половина заменяется наложенными связями. Математическая модель для моделирования растяжения содержит 2436 конечных элементов, а модель для моделирования изгиба – 11832. Причем при моделировании образца при изгибе в расчет принималась только половина образца, в то время как отброшенная часть заменялась граничными условиями.

Анализ полученных данных показывает, что при растяжении деформации одинаковы по всему сечению образца, а при изгибе – изменяются линейно (Рис. 6 - Рис. 8).

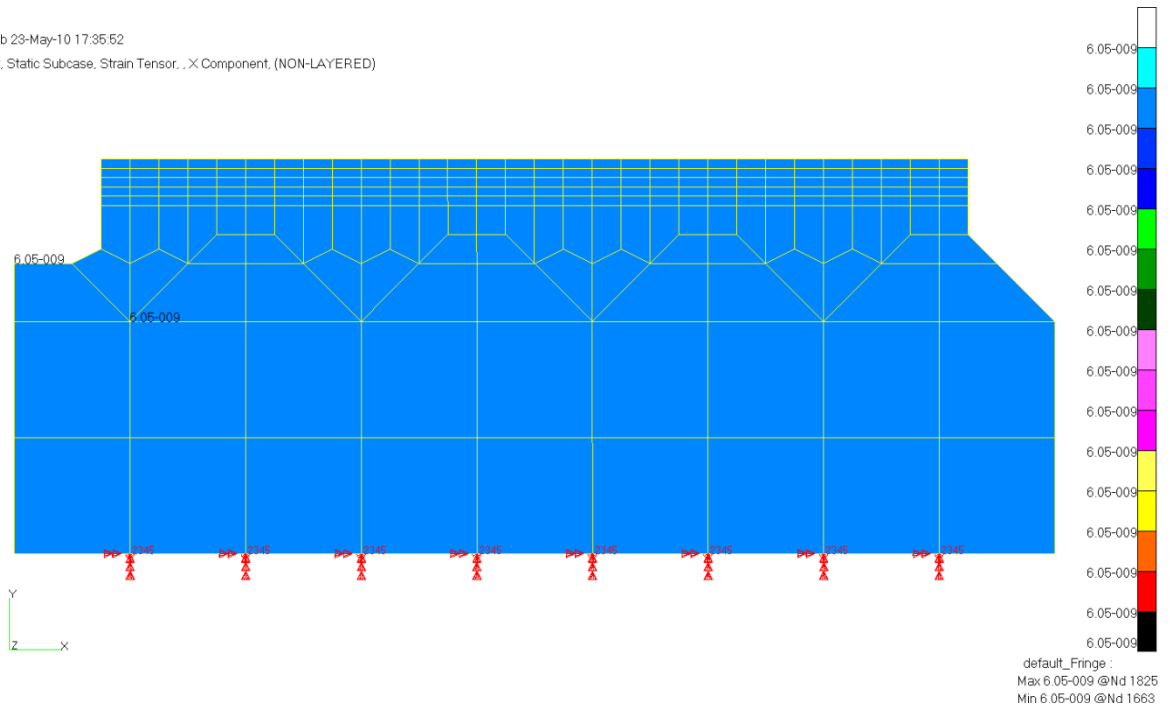


Рис. 6. Распределение деформаций по толщине сечения КЭМ при растяжении.

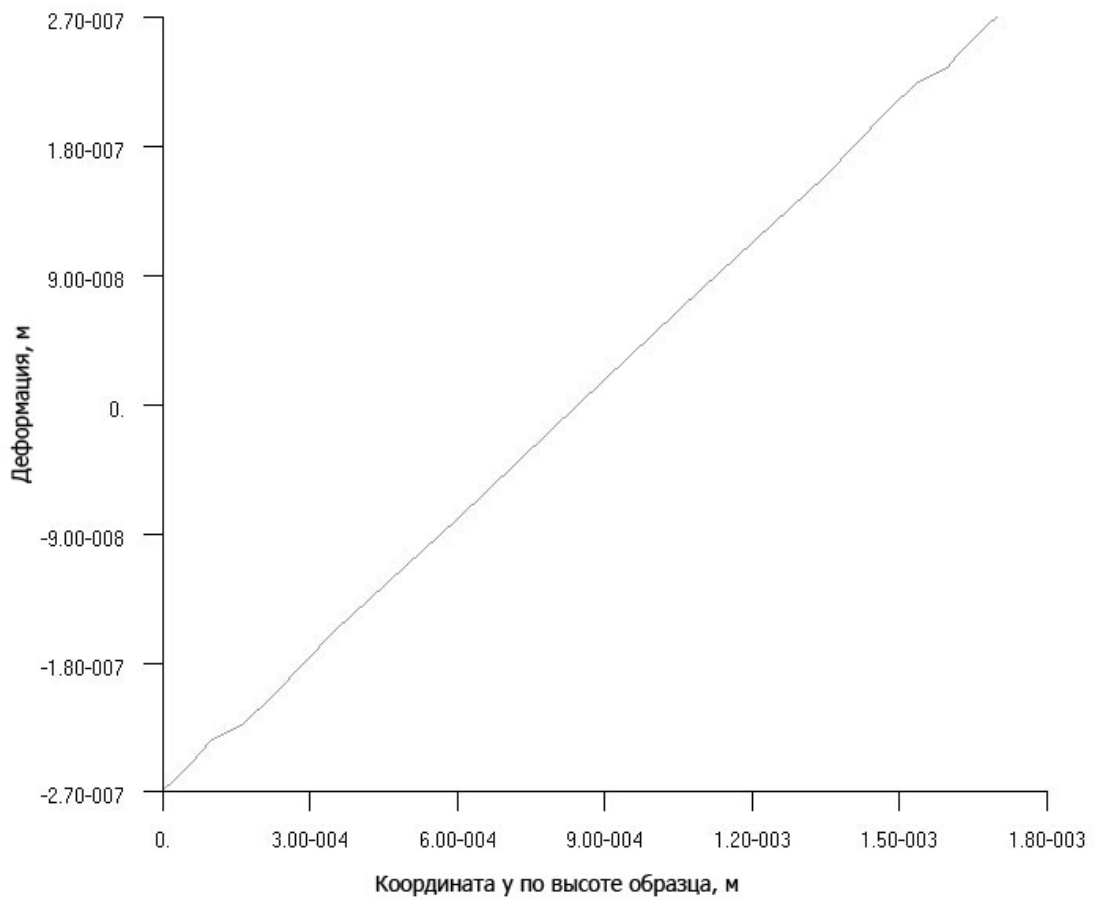


Рис. 7. График изменения деформации по толщине образца при изгибе.

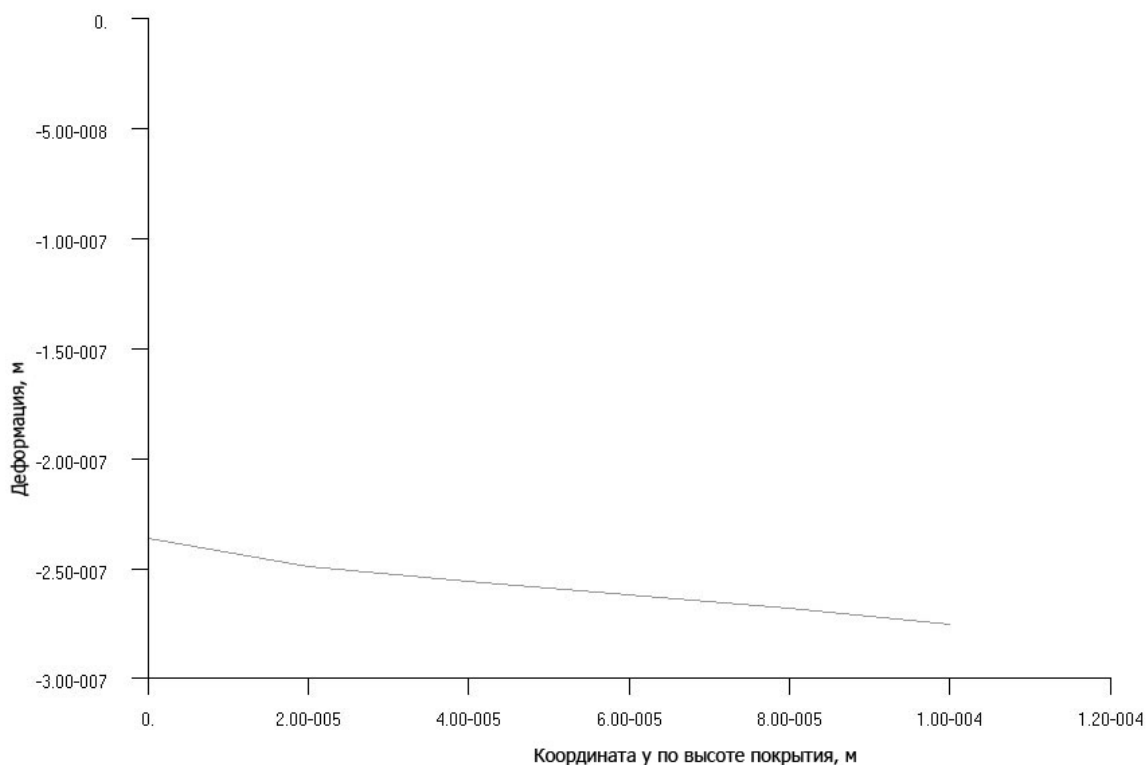


Рис. 8. График изменения деформации по толщине покрытия при изгибе.

## Заключение

В настоящей работе показывается возможность применения правила смесей при определении модуля упругости для различных типов покрытий аналогично применению этого правила для исследования композиционных материалов. Анализируются результаты проведенных экспериментальных исследований стальных пластин прямоугольной формы без покрытия и с защитными покрытиями различных типов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области нанотехнологий и наноматериалов», госконтракт №02.740.11.0790 от 17 мая 2010 года.

## Библиографический список

1. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Наноструктурированные лакокрасочные покрытия: экспериментальные исследования. Материалы I Всероссийской научно-технической школы-семинара «Компьютерный инжиниринг в промышленности и вузах». – М.: 2009, с. 24.

2. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Мир, 1982, 232 с.
3. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979, 191с.
4. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное пособие. – М.: Наука, 1971, 192 с.

### **Сведения об авторах**

Гаврилов Дмитрий Григорьевич – аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета), тел.: +7 499 158-42-23, электронная почта [gavrilovdg@yahoo.com](mailto:gavrilovdg@yahoo.com)

Мамонов Сергей Викторович – аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета), тел.: +7 499 158-43-06, электронная почта [sergei.mamonov@gmail.com](mailto:sergei.mamonov@gmail.com)

Мартыросов Михаил Иванович – доцент Московского авиационного института (государственного технического университета), тел.: +7 499 158-43-06.

Рабинский Лев Наумович – декан факультета «Прикладная механика» Московского авиационного института (государственного технического университета), д. ф.-м. н., профессор, тел.: +7 499 158-00-06, электронная почта [f9\\_dec@mai.ru](mailto:f9_dec@mai.ru)