

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН¹

Соляев Ю.О., Лурье С.А., Рабинский Л.Н.* , Мартиросов М.И.* , Бабайцев А.В.*

*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия***ФГБОУ ВПО Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), г. Москва, Россия*

РЕЗЮМЕ

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование влияния полимерных покрытий на эпоксидно-полиэфирной основе на механические свойства образцов в виде стальных пластин. Показано, что, несмотря на то, что толщина покрытий составляет всего 100 мкм, они оказывают существенное влияние на механические свойства пластин толщиной до 1,5 мм, приводя к снижению модуля Юнга, предела прочности и предельных деформаций образцов. При этом показано, что из испытаний на центральное растяжение и трехточечный изгиб нельзя однозначно определить модуль упругости пластины с покрытием. В испытаниях на изгиб происходит более значительное снижение жесткости пластин, по сравнению с испытаниями на растяжение. Этот эффект подтверждается расчетом в рамках классических моделей теории упругости.

Ключевые слова: стальные пластины; эпоксидное покрытие; механические свойства; растяжение; изгиб; моделирование

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF THE POLYMER POWDER COATING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE STEEL PLATES

Solyaev Y.O., Lurie S.A., Rabinskiy L.N.* , Martirosov M.I.* , Babaytsev A.V.*

*Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia***Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

SUMMARY

We conduct experimental and theoretical study of the effect of polymer coatings on the mechanical properties of the samples in the form of steel plates. It is shown that, despite the fact that the thickness of the coating is 100 microns, it has a significant effect on the mechanical properties of the plate with thickness of 1.5 mm, resulting in a decrease of Young's modulus and tensile strength of the samples. It is shown that tensile and bending tests cannot uniquely identify the elastic modulus of the coated plate. In the bending test it is more significant reduction in stiffness of the plates, compared to the tensile test. This effect is confirmed by calculations in the framework of classical models of the theory of elasticity.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых, проект № МК-5101.2013.8.

Key words: steel plate; polymer coating; mechanical properties; tensile; bending; modelling

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные порошковые покрытия широко используются для защиты от коррозии различных металлических изделий. В авиационной технике полимерными покрытиями защищаются внешние элементы конструкций, в том числе тонкостенные, работающие в условиях воздействия различных климатических факторов.

В состав порошковых полимерных покрытий входят: смола, отвердитель, пигменты и добавки. Смолы придают краске основные свойства, отвердители используются для полимеризации смолы при заданной температуре, пигменты предназначены для получения необходимого цвета и декоративного эффекта, модифицирующие добавки служат для придания специальных свойств (например, для снижения температуры сушки, увеличения твердости поверхности и др.). В данной работе использовалось полимерное покрытие на эпоксидно-полиэфирной основе.

Эпоксидные и полиэфирные смолы в отвержденном состоянии обладают невысокими механическими свойствами, по сравнению с металлами, однако их влияние на характеристики жесткости и прочности тонкостенных элементов конструкций может быть значительным [1-4]. Как будет показано в настоящей работе, полимерное порошковое покрытие толщиной 100 мкм может оказывать существенное влияние на свойства стальных пластин толщиной более 1,5 мм, при соблюдении условия, что пластины обладают достаточно большими размерами в плоскости и могут рассматриваться в рамках модели Кирхгоффа. Очевидно, что для более тонких пластин эффекты влияния покрытий будут увеличиваться.

Для улучшения механических свойств и придания поверхности элементов конструкций дополнительной износостойкости, долговечности и ударопрочности на полимерные покрытия могут наноситься лаки, содержащие наполнители в виде дисперсных керамических частиц [3,4]. Однако в настоящей работе мы будем рассматривать образцы, полученные с применением обычных покрытий без дополнительной защиты керамическими лаками, – на таких образцах исследуемые эффекты проявляются значительнее.

Для определения модуля упругости образцов в виде пластин могут применяться два вида испытаний – на растяжение и на изгиб, которые для однородных изотропных материалов позволяют однозначно (в пределах погрешности испытаний) определить модуль Юнга. Для неоднородных по толщине пластин, которыми и являются пластины с покрытиями, однозначно определить модуль упругости нельзя, так как в испытаниях на изгиб вклад «слабых» слоев покрытия в общую жесткость пластины оказывается более значительным, по сравнению с испытаниями на растяжение. Поэтому модуль Юнга пластин с покрытиями, идентифицируемый в испытаниях на изгиб, всегда оказывается ниже, по сравнению с результатами испытаний на растяжение.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытания проводились на образцах в виде пластин длиной 120°мм, шириной 12°мм и толщиной 0,7°мм и 1,5°мм. Материал пластин (подложек) –

листовая прокатная сталь марки 08ПС (нелегированная конструкционная сталь с малым содержанием углерода). На поверхность пластин наносилось порошковое покрытие на эпоксидно-полиэфирной основе марки EUROPOLVERI (Италия) электростатическим способом. Перед нанесением покрытий проводилась предварительная подготовка поверхности стали: обезжиривание и затем фосфатирование. Толщина покрытия составляла 100 мкм с разбросом значений ± 30 мкм. Нанесение покрытия проводилось в покрасочной камере фирмы Gema (Швейцария). Было изготовлено две партии по десять образцов для проведения испытаний на растяжение и изгиб. Образцы в разных партиях отличались толщиной стальной подложки.

Механические испытания проводились при комнатной температуре на установке Instron 5980 (Великобритания) с программным обеспечением Bluehill 3. Для измерения деформаций образцов при растяжении использовался контактный экстензометр с базой 25 мм. Длина рабочей части образца составляла 80 мм. Испытания на растяжение проводились со скоростью 1°мм/мин на линейном этапе деформирования образца и со скоростью 2°мм/мин после снятия экстензометра на этапе пластического деформирования и разрушения. Из испытаний на растяжение определялся модуль упругости и предел прочности образцов.

В испытаниях на трехточечный изгиб расстояние между опорами составляло 80 мм. Для точного измерения перемещений пластины использовался контактный экстензометр с базой 25 мм, который закреплялся на дефлектометре, установленном по центру под образцом. Испытания на изгиб проводились до максимального значения перемещений центральной точки образца – 1,2 мм. В результате испытаний на изгиб определялся модуль упругости пластин E . Расчетная формула, заложенная в программу Bluehill 3, соответствует стандартному выражению для трехточечного изгиба (ГОСТ 9550-81)

$$E = \frac{L^3 F}{4bh^3 w},$$

где L – расстояние между опорами, F – действующая сила, b и h – ширина и толщина образца, w – перемещения срединной точки образца.

Программа автоматически выбирала наиболее характерный интервал на диаграмме напряжения-деформации для определения модуля упругости образцов.

Характерный вид диаграмм напряжения-деформации для испытаний на растяжение и изгиб образцов толщиной 1,5°мм и 0,7°мм с покрытиями представлен на рис.1. На рис.1в,г представлена диаграмма напряжения-деформации на поверхности образца, которая подвергается растяжению при изгибе. Результаты испытаний представлены в Табл.1.

Установлено, что модуль упругости пластин с покрытиями при растяжении и изгибе оказывается ниже, по сравнению со стандартным значением модуля Юнга используемой марки стали (190 ГПа). При этом в испытаниях на изгиб значение идентифицируемого модуля упругости всех образцов оказалось ниже, по сравнению со значением, полученным в испытаниях на растяжение. Также значение модуля упругости образца с покрытием зависит от толщины стальной подложки – у тонких образцов модуль упругости меньше. Предел прочности обоих партий образцов также снижается и составляет 336°МПа и 236°МПа (рис.1а,б), по сравнению с типичной характеристикой используемой стали – 350°МПа. Предельные деформации образцов в испытаниях на растяжение

снижаются более чем в три раза. Перечисленные эффекты можно объяснить влиянием полимерных покрытий.

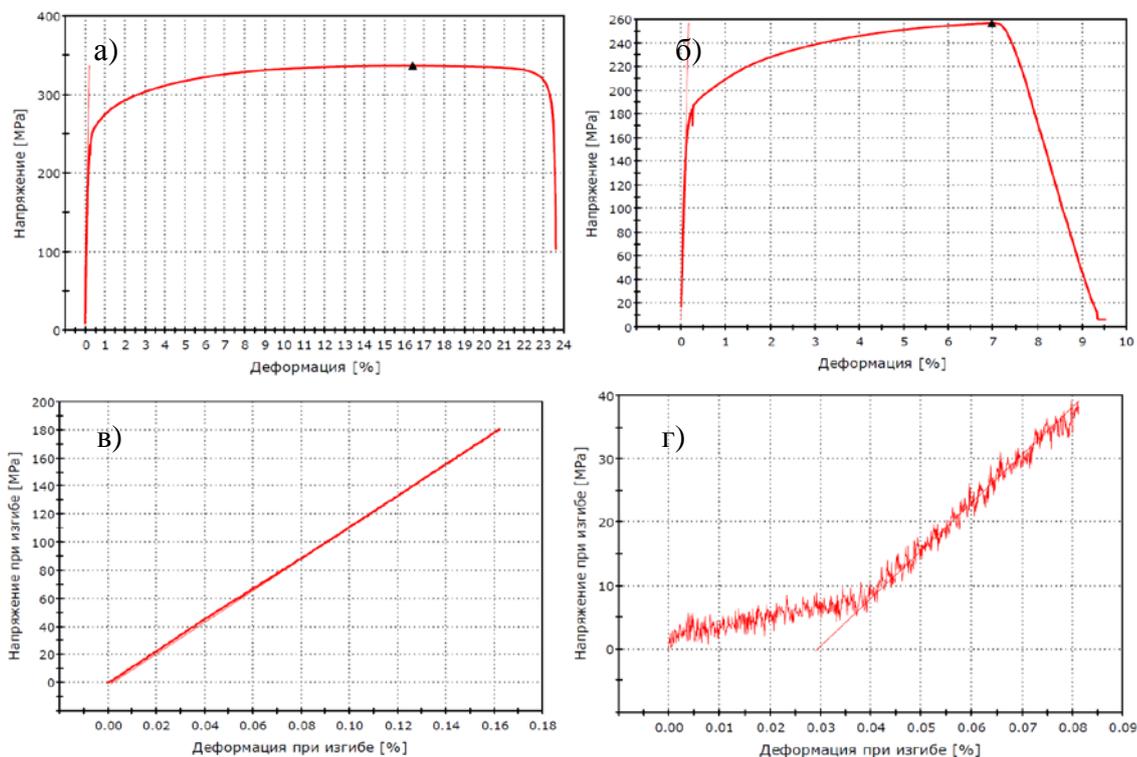


Рис.1. Типичные диаграммы напряжения-деформации, полученные при испытаниях на растяжение и изгиб стальных образцов толщиной 1,5°мм и 0,7°мм с полимерными покрытиями толщиной 100°мкм. а) растяжение, 1,5°мм. б) растяжение, 0,7°мм. в) изгиб, 1,5°мм. д) изгиб, 0,7°мм.

Таблица 1.

Результаты испытаний на растяжение и изгиб (в скобках указано среднеквадратичное отклонение).

Образцы	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Модуль упругости при изгибе, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа
Стальные образцы толщиной 1,5 мм с покрытием	169 (12)	124 (10)	336 (5)
Стальные образцы толщиной 0,7 мм с покрытием	150 (13)	85 (19)	236 (20)

Для тонких образцов получен значительный разброс значений, особенно при определении модуля упругости в испытаниях на изгиб (22%), что связано с недостаточной чувствительностью применяемого оборудования (см.рис.1в). Наличие начального пологого, почти горизонтального участка на диаграмме, приведенной на рис.1в, связано с тем, что между дефлектометром и образцом, лежащим на опорах, перед началом испытаний присутствует небольшой зазор, который сложно устранить вручную, если образцы тонкие и податливые. Наличие

небольшого скачка деформаций в зоне перехода от линейной части диаграммы к пластической на рис.1а,б связано с тем, что в этих точках проводилось снятие экстензометра с образца и дальнейшее измерение деформаций проводилось по перемещениям траверсы.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИН С ПОКРЫТИЯМИ

Пластину с покрытием будем рассматривать, как неоднородную по толщине полосу или балку, состоящую из трех слоев – центральный слой из стали и два внешних слоя из эпоксидной смолы (рис.2).

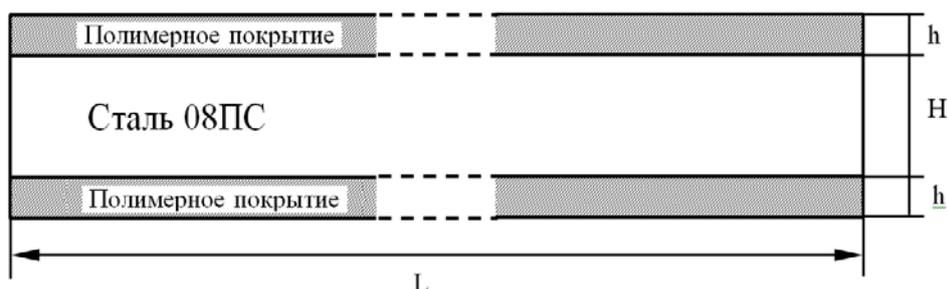


Рис.2. Модель стальных образцов с полимерным покрытием. Длина рабочей части образцов (или расстояние между опорами при изгибе) $L=80^{\circ}\text{мм}$. Толщина слоев покрытия $h=0,1\text{ мм}$, толщина стали $H=0,7^{\circ}\text{мм}$ или $H=1,5^{\circ}\text{мм}$.

Основное соотношение для определения связи между эффективным модулем упругости трехслойного образца и модулями Юнга каждого из слоев можно получить из рассмотрения модели Фойгта. Предполагается, что деформации по толщине образца являются постоянными. В этом случае имеет место следующее соотношение для прогноза модуля упругости образцов с покрытиями при растяжении

$$E_p = 2E_n \frac{S_n}{S} + E_{cm} \frac{S_{cm}}{S} = 2E_n \frac{h}{H+2h} + E_{cm} \frac{H}{H+2h} \quad (1)$$

где $S = (H+2h)b$, E_p – общая площадь сечения образца и эффективный модуль упругости, определяемый по результатам испытания на растяжение образца с покрытием; $S_n = hb$, E_n – площадь поперечного сечения, соответствующая слою покрытия и модуль Юнга покрытия; $S_{cm} = Hb$, E_{cm} – площадь поперечного сечения и модуль Юнга слоя стали; H – толщина слоя стали, h – толщина слоя покрытия, $H+2h$ – толщина образца с покрытием; b – ширина образца.

Приближенная оценка предела прочности образцов при растяжении σ_B также может быть получена с использованием модели Фойгта

$$\sigma_B = 2\sigma_{Bn} \frac{h}{H+2h} + \sigma_{Bcm} \frac{H}{H+2h} \quad (2)$$

Здесь σ_{Bn} , σ_{Bcm} – пределы прочности материалов покрытия и стали. В расчетах будем считать, что $\sigma_{Bn} = 40\text{МПа}$, $\sigma_{Bcm} = 350\text{МПа}$.

Для моделирования деформированного состояния пластин с покрытиями при испытаниях на трехточечный изгиб будем использовать соотношения теории

изгиба неоднородных балок [5,6]. Изгибающий момент M , действующий в центральной части образца, можно представить в виде суммы

$$M = M_n + M_{cm}$$

где M_n – часть момента, приходящаяся на слои покрытия, M_{cm} – часть момента, соответствующая сопротивлению стальной полосы.

Выражая моменты через модули Юнга и моменты инерции слоев и учитывая наличие двух слоев покрытия, получаем

$$\frac{E_u J}{R} = 2 \frac{E_n J_n}{R} + \frac{E_{cm} J_{cm}}{R}$$

где E_u – эффективный модуль упругости, который может быть определен для образца с покрытием в испытаниях на изгиб, J , J_n , J_{cm} – моменты инерции полного поперечного сечения образца, слоя покрытия и стали, соответственно; R – радиус кривизны изогнутого образца.

Таким образом, для прогноза модуля упругости пластин с покрытиями, определяемого в испытаниях на изгиб, будем использовать следующее выражение

$$E_u = 2E_n \frac{J_n}{J} + E_{cm} \frac{J_{cm}}{J} \quad (3)$$

Моменты инерции полного поперечного сечения и слоев стали и покрытия определяются по формулам

$$J = \frac{b(H+2h)^3}{12}; \quad J_{cm} = \frac{bH^3}{12}; \quad J_n = \frac{bh^3}{12} + \left(\frac{h+H}{2}\right)^2 hb \quad (4)$$

Здесь учтено, что слои покрытия смещены относительно нейтральной линии образца на величину $(H+h)/2$. Подставляя (4) в (3), получаем следующую нелинейную зависимость изгибного модуля упругости образца от толщины слоев покрытия и стали

$$E_u = 2E_n \frac{4h^3 + 6h^2H + 3hH^2}{(H+2h)^3} + E_{cm} \frac{H^3}{(H+2h)^3} \quad (5)$$

На рис.2 представлена зависимость значений модулей упругости при растяжении и изгибе образцов с покрытиями, рассчитанная по формулам (1) и (5).

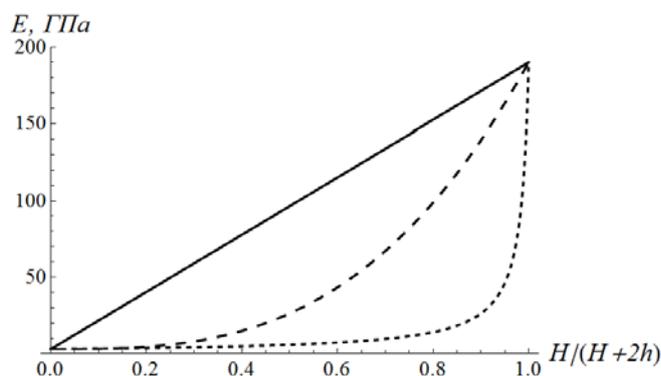


Рис.2. Рассчитанная зависимость модуля упругости пластин с покрытием от относительной толщины стали. Сплошная линия – модуль упругости при растяжении E_p (1), штриховая – модуль упругости при изгибе E_u (5), пунктирная – осреднение по Рейсу.

В качестве исходных данных использованы стандартные значения модулей Юнга используемых материалов: для стали 08ПС модуль Юнга составляет $E_{cm}=190$ ГПа, для полимерного покрытия – $E_n=3$ ГПа. Зависимость построена от относительной толщины слоя стали в образце $H/(H+2h)$. При растяжении имеет место линейная зависимость модуля упругости E_p от этого параметра (см. выражение (1)). Изгибный модуль E_u нелинейно зависит от относительной толщины слоя стали, и его расчетные значения всегда оказываются ниже E_p . На рис.2 также показана нижняя граница вилки Фойгта-Рейса – осреднение по Рейсу. Видно, что рассчитанные значения изгибного модуля не выходят за пределы этой вилки.

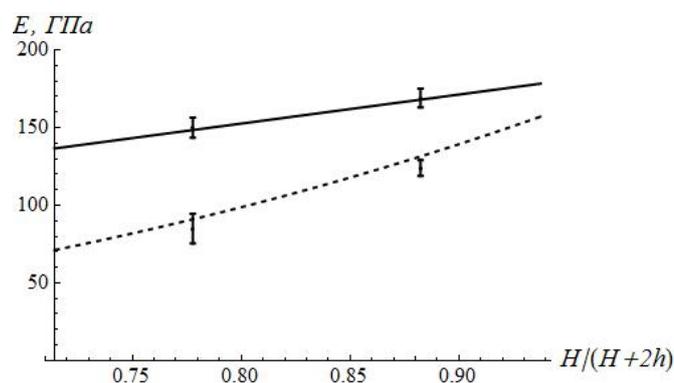


Рис.3. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений модулей упругости пластин с покрытиями. Сплошная линия – модуль упругости при растяжении (1), штриховая – модуль упругости при изгибе (5). Вертикальные полосы соответствуют разбросу полученных экспериментальных данных.

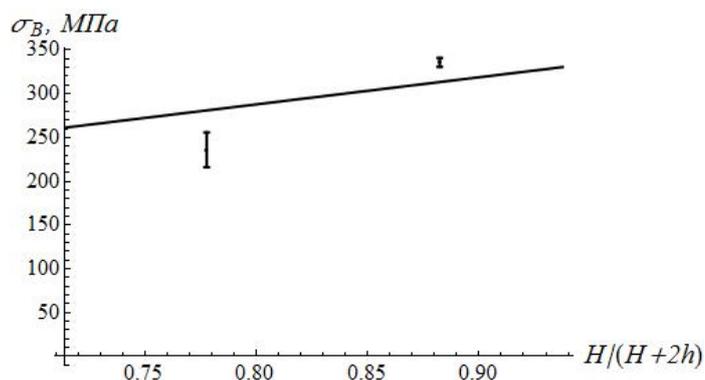


Рис.4. Сопоставление экспериментальных значений предела прочности образцов (вертикальные линии, соответствующие разбросу значений) и приближенной зависимости (2).

На рис.3 представлено сопоставление рассчитанных значений модулей упругости и экспериментальных данных, полученных в результате испытаний образцов толщиной 1,5°мм и 0,7°мм на центральное растяжение и трехточечный изгиб. Показан разброс полученных экспериментальных значений. Результаты эксперимента достаточно хорошо соответствуют рассчитанным значениям, за исключением результатов испытаний на изгиб тонких образцов толщиной

0,7°мм. Это связано, по-видимому, с недостаточной точностью применяемого испытательного оборудования для слишком тонких и податливых образцов.

На рис.4 представлено сопоставление экспериментальных значений предела прочности образцов и приближенной зависимости (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе исследуется проблема изменения механических свойств тонких стальных пластин, на поверхности которых нанесены защитные эпоксидные покрытия. Обеспечивая необходимую защиту от коррозии, полимерные покрытия приводят к снижению механических характеристик образцов. Модуль упругости пластин толщиной 1,5°мм с покрытием толщиной 100°мкм может снижаться более чем на 10% в испытаниях на растяжение и более чем на 20% в испытаниях на изгиб. Модули упругости пластин толщиной 0,7°мм снижаются, соответственно, более чем на 20% и 40% в испытаниях на растяжение и изгиб. Предел прочности и предельные деформации образцов с покрытиями также снижаются.

Неоднозначность определяемых экспериментальных значений модуля упругости пластин с покрытиями непосредственно следует из расчетов в рамках классических моделей теории упругости. Для моделирования эффективного модуля упругости пластин при растяжении привлекается модель трехслойной неоднородной полосы и осреднение по Фойгту. Для моделирования эффективного изгибного модуля образцов привлекается теория изгиба неоднородных балок. Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений модулей упругости, определенных в испытаниях на центральное растяжение и трехточечный изгиб. Погрешность вычислений при этом не превышает 5% для пластин толщиной 1,5°мм и 10% для пластин толщиной 0,7°мм. Для оценки предела прочности образцов использована приближенная оценка по Фойгту, которая дает погрешность, по отношению к экспериментальным данным, порядка 10-15% в зависимости от толщины стальной подложки.

В результате можно утверждать, что при моделировании напряженно-деформированного состояния тонких пластинчатых элементов конструкций с полимерными порошковыми покрытиями недостаточно использовать модель однородной пластины, обладающей эффективными характеристиками, но необходимо в явном виде учитывать наличие покрытий в виде дополнительных поверхностных слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н.* Сравнительная характеристика прочностных свойств образцов с различными типами покрытий для изделий авиационной техники // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. – 2010. – Вып. №40. – С.1-14.
2. *Гаврилов Д.Г., Зезин Ю.П., Ломакин Е.В., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н.* Изучение механических свойств наноструктурированных лакокрасочных покрытий // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2010. – Т.16. – №4/2.– С.639-647.
3. *Гаврилов Д.Г., Корнев Ю.В., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н.* Наноиндентирование порошковых лакокрасочных покрытий, наносимых

- на металлические поверхности // Вестник Московского авиационного института. – 2011. – Т.18. – №1.– С.81-91.
4. Зезин Ю.П., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Экспериментальное исследование изменения механических свойств стальных образцов при нанесении лакокрасочных покрытий // Нелинейный мир. – 2011. – Т.9. – №7.– С.436-438.
 5. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Т.1. – М.: Наука, 1965. – 364 с.
 6. Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1975. – 654 с.

Поступила в редакцию 10 февраля 2015 года.

Сведения об авторах:

Соляев Юрий Олегович – к.т.н., с.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: solyaev@bk.ru

Лурье Сергей Альбертович – д.т.н., проф., зав. лаб., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: salurie@mail.ru

Рабинский Лев Наумович – д.ф.-м.н., декан факультета «Прикладная механика», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; e-mail: f9_dec@mai.ru

Мартиросов Михаил Иванович – к.т.н., доцент кафедры «Сопротивление материалов, динамика и прочность машин», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; e-mail: martirosova@ultranet.ru

Бабайцев Арсений Владимирович – асп., Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия