



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФАКУЛЬТЕТ «ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ»
КАФЕДРА «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Контрольные задания и методические указания к их выполнению
для студентов заочного отделения
направления 22.03.01 – Материаловедение и технологии материалов

Автор-составитель:
д-р техн. наук, проф. Кудряков О.В.

Ростов-на-Дону. 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Методические указания к выполнению контрольного задания	3
Содержание и последовательность выполнения контрольного задания	7
Варианты контрольных заданий	8
Справочные значения	9
Список литературы	9

Методические указания к выполнению контрольного задания

Покрyтия представляют собой объект, весьма протяженный в двух пространственных направлениях, по которым он сравним с размерами всего изделия (т. е. подложки, на которое покрытие нанесено), и довольно малый в третьем пространственном измерении, перпендикулярном поверхности подложки (т.е. в направлении толщины покрытия). Уже одна эта особенность покрытий предполагает их анизотропию – неодинаковость свойств, измеренных в этих (различных, ортогональных) направлениях. В анизотропию покрытия вносит свой вклад также его внутренняя структура и технология нанесения покрытия. Анизотропное покрытие будет себя по-разному проявлять в различных условиях внешнего нагружения, что часто определяет его работоспособность и стойкость к изнашиванию при эксплуатации. Поэтому расчет предельных нагрузок, которые может выдержать покрытие в условиях нормальных и тангенциальных внешних нагрузок, имеет важное прикладное значение и в конечном итоге определяет возможность использования того или иного покрытия в конкретных условиях эксплуатации.

Одному из вариантов такого расчета, выявляющему предельные возможности анизотропного покрытия в нормальном и тангенциальном направлениях, посвящено настоящее контрольное задание.

В качестве объекта расчета взято композиционное многослойное покрытие, полученное, предположим, на стальной подложке по вакуумной ионно-плазменной технологии (подробнее об этой технологии можно узнать в источниках [1-5]). Для определенности пусть покрытие имеет металлокерамическую природу, т.е. слой чистого металла чередуется со слоями оксида, карбида или нитрида либо этого же, либо какого-либо другого металла. Таким образом, в исследуемом покрытии чередуются весьма пластичные (металлические) и довольно твердые (керамические – оксидные, карбидные или

нитридные) слои, что полностью соответствует определению композиционного материала. Ионно-плазменная технология позволяет наносить такие многослойные композиционные покрытия при большом многообразии попарного сочетания пластичных и прочных слоёв. Общая толщина вакуумных ионно-плазменных покрытий обычно не превышает нескольких десятков микрометров. При этом толщина слоёв может варьироваться в широких пределах – от наноразмерных до микронных. Договоримся для будущих расчетов считать металлические слои матрицей композиционного покрытия (обозначается буквой «m» на рис. 1), а керамические слои – упрочняющей фазой (обозначается буквой «f» на рис. 1).

В механике материалов обычно считается, что материал конструкции, узла, агрегата, изделия или покрытия может удовлетворительно эксплуатироваться, если он воспринимает внешние нагрузки, не выходя из области упругих деформаций, то есть пластическая деформация не допускается. В этом случае основным, рассматриваемым при расчетах на прочность, физико-механическим свойством покрытия является модуль упругости E . Он представляет собой коэффициент пропорциональности в известном законе Гука между приложенным к покрытию напряжением σ и упругой деформацией ε , испытываемой материалом покрытия под действием напряжения σ :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Проецируя этот закон на композиционные слоистые покрытия, следует принимать во внимание, что модуль упругости композиционных материалов значительно выше модуля матриц («m» на рис. 1), но ниже модуля упрочняющей фазы («f» на рис. 1). При этом композиты обычно крайне анизотропны и их модуль упругости в направлении слоёв значительно выше, чем в перпендикулярном направлении [6, 7].

Рассмотри способ оценки модуля упругости слоистого композиционного покрытия.

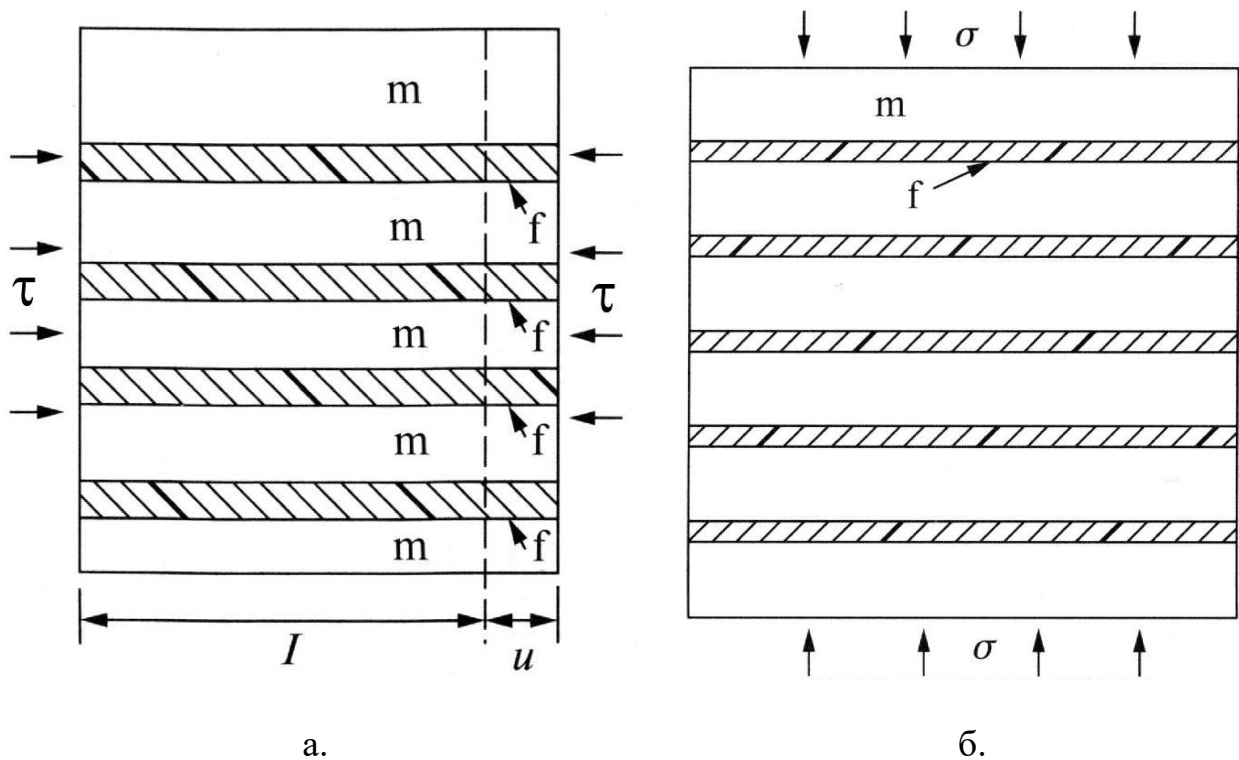


Рисунок 1 – Схемы для оценки модуля упругости E слоистого композиционного покрытия при нагружении вдоль направления слоёв (а – равная деформация $\varepsilon_n = u / I$ слоёв упрочняющей фазы f и матрицы m) и в перпендикулярном направлении (б – равные напряжения слоёв упрочняющей фазы f и матрицы m)

Предположим, что композит с объемной долей упрочняющей фазы V_f нагружается тангенциальной нагрузкой τ вдоль оси слоёв. То есть параллельно поверхности подложки (рис. 1 а). При нагружении средняя деформация ε_n упрочняющей фазы и матрицы одинакова. Суммарная нагрузка, испытываемая композитом, равна:

$$\tau = V_f \cdot \tau_f + (1 - V_f) \cdot \tau_m \quad (2)$$

Поскольку, в соответствии с законом Гука (1) $\sigma = E \cdot \varepsilon_n$, то выражение (2) приобретает следующий вид:

$$\tau = E_f \cdot V_f \cdot \varepsilon_n + E_m \cdot (1 - V_f) \cdot \varepsilon_n \quad (3)$$

Так как для композита в целом $E_C = \tau / \varepsilon_n$, то в итоге получаем:

$$E_C = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) \quad (4)$$

Эта формула определяет максимально возможное значение модуля упругости слоистого композиционного покрытия.

Теперь рассмотрим действие нормальной нагрузки σ на покрытие, то есть направленной перпендикулярно к направлению слоёв покрытия (рис. 1 б). В этом случае равны напряжения упрочняющей фазы и матрицы, а не их деформации. Для этого случая средняя деформация ε_n равна сумме деформаций упрочняющей фазы и матрицы с учетом их доли:

$$\varepsilon_n = V_f \cdot \varepsilon_{nf} + (1 - V_f) \cdot \varepsilon_{nm} \quad (5)$$

Учитывая, что $\varepsilon = \sigma / E$, получим:

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma}{E_f} \cdot V_f + \frac{\sigma}{E_m} \cdot (1 - V_f) \quad (6)$$

Поскольку модуль упругости композита в целом по-прежнему равен $E_C = \sigma / \varepsilon_n$, получаем:

$$E_C = \frac{1}{\frac{V_f}{E_f} + \frac{1 - V_f}{E_m}} \quad (7)$$

Эта формула определяет нижний предел модуля упругости многослойного композиционного покрытия.

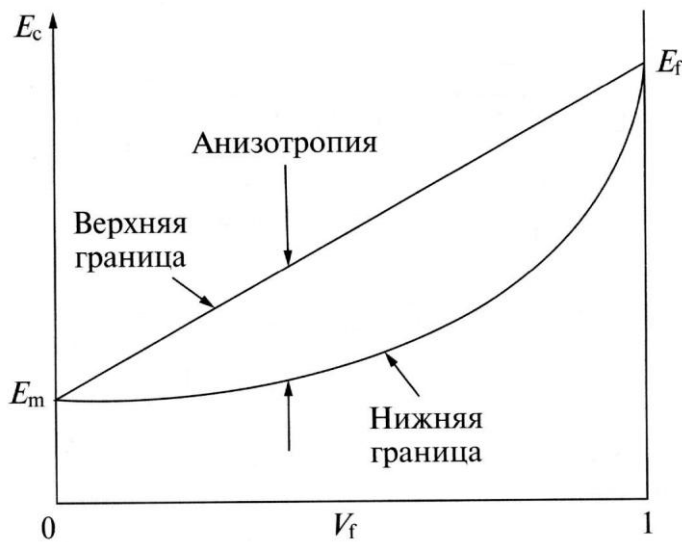


Рисунок 2 – Изменение верхней и нижней границы значений модуля упругости E_C слоистого композиционного покрытия в зависимости от объемной доли упрочняющей фазы V_f ; расстояние между границами характеризует величину анизотропии покрытия для каждого фиксированного значения V_f

Полученные оценки предельных значений модуля упругости композиционного покрытия E_C , соответствующие выражениям (4) и (7), определяются взаиморасположением прикладываемой нагрузки (τ , σ) и направлением слоёв упрочняющей фазы. Иллюстрация полученных оценочных выражений в графическом виде представлена на рис. 2. Полученный график показывает, что многослойные вакуумные ионно-плазменные композиционные

покрытия имеют более высокую жесткость вдоль направления слоёв упрочняющей фазы, следовательно, будут оказывать более высокое сопротивление тангенциальным нагрузкам τ (верхняя граница модуля упругости на рис. 2), чем нагрузкам нормальным σ (нижняя граница модуля упругости на рис. 2). Учет полученной анизотропии значений E покрытия важен при определении области его использования. Например, такие покрытия показывают более высокую износостойкость при использовании на контактных поверхностях узлов трения в машиностроительных агрегатах (где более существенны тангенциальные нагрузки), чем при нанесении их для защиты от абразивно-ударного эрозионного воздействия (где нагрузки имеют в основном нормальный характер с небольшими вариациями угла атаки).

Содержание и последовательность выполнения контрольного задания

1. Внимательно ознакомьтесь с методическими указаниями, представленными в предыдущем разделе. Там речь идет о композиционных покрытиях, полученных по вакуумной ионно-плазменной технологии. Уясните технологические принципы и особенности формирования покрытий этим методом, воспользовавшись конспектом лекций (С. 27–40), размещенном на сайте университета, или используя другие доступные источники, например, [1-5]. Кратко изложите суть технологии вакуумного ионно-плазменного нанесения покрытий в виде первого раздела контрольного задания на 1–3 страницах текста с иллюстрациями. Уделите особое внимание получению многослойных композиционных покрытий.
2. Выберите из табл. 1 состав и свойства покрытия, соответствующие вашему варианту.
3. Выполните расчет предельных значений модуля упругости E_C (верхней и нижней его границ) в соответствии с выражениями (4) и (7) для четырех значений $V_f = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$. Результаты расчетов вместе с заданными значениями E_f и E_m представьте в виде таблицы. Выполните аналогичный расчет для эталонного многослойного покрытия системы Ti/TiN, его результаты разместите в той же таблице.

4. По результатам расчетов (по расчетным точкам, приведенным в вашей таблице) постройте графики, аналогичные рис. 2. Для наглядности изобразите графики заданного и эталонного (Ti/TiN) покрытий в единой системе координат – на одном рисунке. Рисунок должен быть построен в реальном линейном масштабе осей E_C (ГПа) и V_f (доли единицы).
5. По результатам расчетов и построений проведите сравнительный анализ анизотропии заданного и эталонного покрытий, а также целесообразности использования одного из них в качестве антифрикционного защитного покрытия поверхности трения. Ответы должны быть обоснованы.
6. Выполненная и оформленная контрольная работа, представляемая преподавателю, должна быть разбита на озаглавленные разделы, соответствующие последовательности и содержанию п.1–5.

Таблица 1. Варианты контрольных заданий

Вариант задания	Состав		Вариант задания	Состав	
	матрицы	упрочняющей фазы		матрицы	упрочняющей фазы
Эталон	Ti	Нитрид титана TiN	8	Zr	TiN
1	Ti	Карбид титана TiC	9	Ni	TiN
2	Ti	Борид титана TiB ₂	10	Нитрид ванадия VN	TiN
3	Ti	Ni	11	Нитрид кремния Si ₃ N ₄	TiN
4	Ti	Mo	12	Cr	Нитрид хрома CrN
5	Zr	Ti	13	Al	Оксид алюминия Al ₂ O ₃
6	Al	Ti	14	Zr	Нитрид циркония ZrN
7	Nb	Co	15	Zr	Оксид циркония ZrO ₂

Таблица 2. Справочные значения модуля упругости E некоторых веществ, ГПа

Ti	Ni	Mo	Zr	Al	Nb	Co	Cr
116	214	310	96	71	92	206	290
Нитрид титана TiN	Карбид титана TiC	Борид титана TiB ₂	Нитрид кремния Si ₃ N ₄	Нитрид алюминия AlN	Нитрид хрома CrN	Нитрид циркония ZrN	Оксид алюминия Al ₂ O ₃
256	374	495	296	235	320	510	382

* – а также: модуль упругости оксида циркония ZrO₂ составляет 172 ГПа.

Список литературы

1. Тушинский Л.И. и др. Методы исследований материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Тушинский Л.И., Плохов А. В., Токарев А. О., Синдеев В. И. – М.: Мир, 2004. - 384 с.
2. Наноструктурные покрытия / Под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. – М.: Техносфера, 2011. – 752 с.
3. Структура и свойства нанокompозитных, гибридных и полимерных покрытий / А.Д. Погребняк, А.А. Лозован, Г.В. Кирик, Н.Н. Щитов и др. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 344 с.
4. Азаренков Н.А., Береснев В.М., Погребняк А.Д., Колесников Д.А. Наноструктурные покрытия и наноматериалы: Основы получения. Свойства. Области применения. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 368с.
5. Ильин А.А., Плихунов В.В., Петров Л.М., В.С. Спектор. Вакуумная ионно-плазменная обработка. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 160 с.
6. Эшби М., Джонс Д. Конструкционные материалы. Полный курс. Учебное пособие / М. Эшби. Д. Джонс – пер. с англ. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 672 с. (С. 44, 75-78)
7. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. (С. 46-64)