



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

Yu. P. Zezin, E. V. Lomakin, S. V. Mamonov, M. I. Martirosov, L. N. Rabinsky, P. V. Chistjakov, Determination of elastic characteristics of polymeric covers by results of tests of flat specimens at tension and bending, *Izv. Saratov Univ. Math. Mech. Inform.*, 2012, Volume 12, Issue 3, 66–72

DOI: 10.18500/1816-9791-2012-12-3-66-72

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 34.239.153.44

November 3, 2024, 00:21:43





## Библиографический список

1. Обрезан А. Г., Шункевич Т. Н. Теория «периферического сердца» профессора М. В. Яновского: классические и современные представления // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Сер. 11. 2008. № 3. С. 14–23.
2. Гуляев Ю. П., Коссович Л. Ю. Математические модели биомеханики в медицине. Саратов, 2001. 49 с.
3. Вильде М. В., Гуляев Ю. П. Низкочастотные осесимметричные волны в кровеносных сосудах постоянного сечения: асимптотический подход // Изв. РАН. 2009. № 4. С. 136–151.

УДК 539.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ И ИЗГИБ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ

Ю. П. Зезин, Е. В. Ломакин, С. В. Мамонов\*,  
М. И. Мартиросов\*, Л. Н. Рабинский\*, П. В. Чистяков

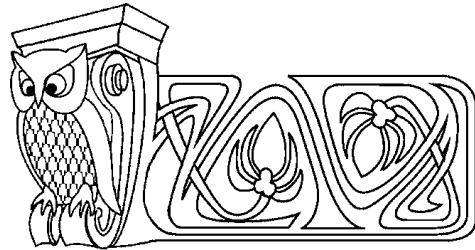
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
E-mail: yuzezin@gmail.com, lomakin@mech.math.msu.su,  
chist206@yandex.ru

\*Московский авиационный институт

E-mail: sergei.mamonov@gmail.com, f9\_dec@mai.ru

Представлены результаты экспериментального определения модуля упругости и коэффициента Пуассона тонких полимерных покрытий на поверхности образцов стали 08-ПС. Оценки модуля упругости получены с использованием простейших правил смесей по результатам стандартных испытаний образцов с покрытиями на растяжение и четырехточечный изгиб. Значения коэффициента Пуассона получены на основе сопоставления результатов испытаний и численного моделирования процесса изгиба исследуемых образцов. Показано, что оба метода дают близкие значения модуля упругости для различных модификаций исследуемых покрытий.

**Ключевые слова:** покрытия, полимеры, механические характеристики, модуль упругости, коэффициент Пуассона, растяжение, изгиб.



## Determination of Elastic Characteristics of Polymeric Covers by Results of Tests of Flat Specimens at Tension and Bending

Yu. P. Zezin, E. V. Lomakin, S. V. Mamonov, M. I. Martirosov,  
L. N. Rabinsky, P. V. Chistjakov

The results of experimental identification of elastic modulus and Poisson's ratio of thin polymeric covers on the surface of the flat specimens of steel 08-OP are presented. The values of elastic modulus were determined with the rule of the mixtures by the standard tests of the specimens with the covers at the tension and four-point bending. The values of the Poisson's ratio were obtained on the base of the comparison of the tests results and the computer modeling of the bending process the studied specimens. It was shown that both methods give us the narrow values of elastic characteristics for different modifications of the studied covers.

**Key words:** covers, polymers, mechanical characteristics, stiffness modulus, Poisson's ratio, tension, bending.

В настоящее время практически на все элементы машиностроительных конструкций из металлов наносят различные покрытия. Основной задачей нанесения покрытий является защита деталей машин и металлических конструкций от коррозии и износа. Подсчитано [1], что потери металла, связанные с коррозией и износом, составляют около 1/3 ежегодной выплавки этих материалов. Эксплуатационные расходы, связанные с коррозией и износом оборудования, сопоставимы со стоимостью самого оборудования. Коррозия и износ являются причиной 80% общих потерь рабочего времени в процессе эксплуатации оборудования.

Тем не менее, несмотря на несомненную важность и во многих случаях незаменимость покрытий в современной технике, к настоящему времени не разработано стандартных методов определения их упругих характеристик. Среди множества методов испытаний лакокрасочных покрытий лишь три относятся к оценке механических характеристик: испытания на изгиб, испытания на удар и определение стойкости к истиранию [2]. В испытаниях на изгиб определяют наименьший радиус изгиба образца-полосы с исследуемым покрытием, при котором не происходит растрескивание покрытия. В испытаниях на удар определяют наибольшую высоту падения груза массой 1 кг, при которой не наблюдается повреждений покрытия. Результаты подобных испытаний носят качественный характер и могут использоваться лишь для сравнения покрытий. Очевидно, что методы испытаний, позволяющие оценить прочность и упругие характеристики покрытия, имеют целый ряд преимуществ. Знание



механических характеристик даёт возможность конструкторам не только более обоснованно выбирать необходимый тип покрытий и способ их нанесения, но также прогнозировать работоспособность проектируемых деталей и конструкций в условиях эксплуатации.

В данной работе предпринята попытка оценки модуля упругости порошковых полимерных покрытий по результатам стандартных испытаний на растяжение и изгиб трехслойных образцов-полос. Проведены испытания двух полимерных покрытий нанесённых на поверхности образцов листовой прокатной стали 08-ПС. Для каждого из покрытий определены значения модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Основой покрытий являлась краска RAL 9005 на эпоксидно-полиэфирной основе с добавлением современных защитных лаков. В работе принята следующая маркировка исследуемых покрытий:

- покрытие № 1, краска черная RAL 9005, порошковая, глянцевая без лака;
- покрытие № 2, краска черная RAL 9005, порошковая, глянцевая с добавлением прозрачного керамического наноструктурированного лака Ceramiclear Deltron D8105 фирмы PPG Industries (США).

Покрытия наносились на образцы листовой стали 08-ПС в виде полос шириной 12 мм и длиной 120 мм. Толщина стальных полос варьировалась на трех уровнях: 0.75 мм, 0.95 мм и 1.45 мм. Перед нанесением покрытий проводилась предварительная подготовка поверхностей образцов: обезжиривание и фосфатирование для улучшения адгезии покрытий и замедления распространения подпленочной коррозии.

Нанесение покрытий проводилось в камере Gema (Швейцария) в соответствии с принятой технологией. Толщина покрытий составляла 0.1 мм и контролировалась электронным толщиномером QuaNix 7500 (Германия), предназначенным для измерения толщины покрытия на ферромагнитных и неферромагнитных поверхностях.

В соответствии с предлагаемыми методами определение модуля упругости покрытия основано на сопоставлении значений модуля упругости при растяжении или сжатии, полученных для исходного материала (в рассматриваемом исследовании сталь 08-ПС) и для образцов с изучаемыми покрытиями. Различия между этими величинами составляют 10–15%. В этом случае точность оценки модуля упругости покрытия в значительной степени зависит от точности определения напряжения и деформации в процессе испытаний образцов материалов. В данной работе для испытаний образцов исходной стали и образцов с покрытиями использована современная испытательная машина Zwick Z100, позволяющая с высокой точностью определять силы и перемещения при растяжении и изгибе. Система измерения силы в процессе испытания основана на применении тензометрического динамометра и обеспечивает класс точности 0.5 в диапазоне измерений, реализованном в работе. Деформация образца в процессе испытаний на растяжение регистрировалась с применением стандартного экстензометра, входящего в комплект испытательной машины. Расстояние между щупами экстензометра составляло 35 мм.

Эффективный модуль упругости полос с покрытиями определялся по результатам испытаний образцов на растяжение с постоянной скоростью перемещения захватов 0.05 мм/с, что соответствует скорости деформации  $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . В этом же режиме были проведены испытания на растяжение полос листовой стали 08-ПС, на которые наносились покрытия.

Для определения модуля упругости стали 08-ПС проведено 7 испытаний образцов без покрытий шириной 12 мм и толщиной 1.41 мм. Для дальнейших вычислений принималось среднее значение модуля упругости стали  $1.96 \cdot 10^5$  МПа. Среднеквадратичное отклонение при этом составляло  $5.83 \cdot 10^3$  МПа.

Для определения модуля упругости покрытия по результатам испытаний на растяжение образца-полосы с покрытием воспользуемся простейшим решением соответствующей задачи. Примем, что в испытании задается определенный уровень деформаций, общий как для слоя покрытия, так и для полосы стали. Используем уравнение равновесия полосы, которое в рассматриваемом случае запишем в виде

$$E_0 S_0 = E_n S_n + E_{ст} S_{ст}, \quad (1)$$

где  $E_0$  — эффективный модуль упругости;  $S_0$  — общая площадь сечения образца-полосы с покрытием, определяемый по результатам испытания на растяжение полосы с покрытием;  $E_n$  — модуль упруго-



сти покрытия;  $S_{\text{п}}$  — площадь поперечного сечения, соответствующая слою покрытия;  $S_{\text{ст}}$  — модуль упругости стали;  $E_{\text{ст}}$  — площадь поперечного сечения стальной полосы.

На рис. 1 представлена характерная кривая растяжения полосы с покрытием № 1, на рис. 2 — фрагмент диаграммы растяжения, соответствующий упругому сопротивлению образца.

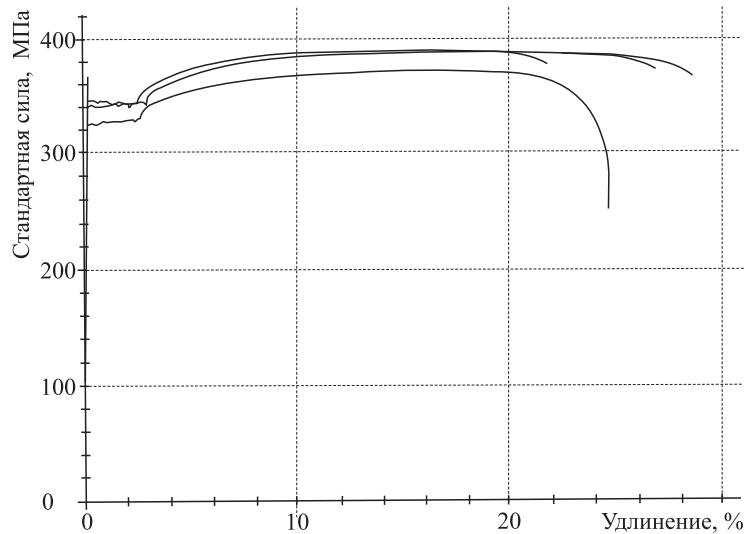


Рис. 1. Экспериментальные кривые растяжения образцов с покрытиями № 1

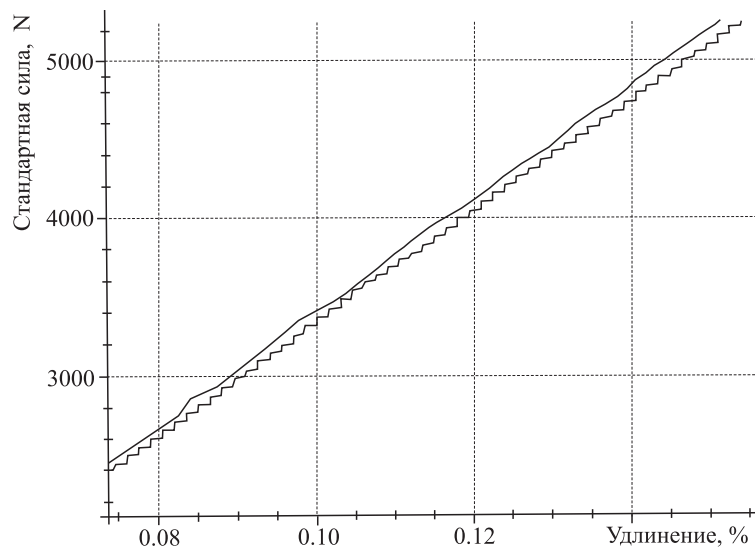


Рис. 2. Фрагменты кривых растяжения образцов с покрытием № 1, соответствующие участку упругого сопротивления деформированию

По этим данным и определялось значение эффективного модуля упругости для трехслойных образцов. Далее значение модуля упругости покрытия определялось в соответствии с соотношением (1). Результаты определения модулей упругости покрытий при растяжении представлены в табл. 1, в которой принята двойная нумерация испытываемых образцов: первая цифра обозначает тип покрытия (1 или 2), вторая — порядковый номер испытания. Средние значения модуля упругости для исследуемых покрытий составляют  $3.53 \cdot 10^4$  МПа для покрытия № 1 и  $2.81 \cdot 10^4$  МПа для покрытия № 2 при среднеквадратичных отклонениях  $0.26 \cdot 10^4$  МПа и  $1.23 \cdot 10^4$  МПа соответственно [3].

Другой способ определения модуля упругости покрытий предполагает использование экспериментальной оценки эффективного модуля упругости образцов с покрытиями при изгибе. В предлагаемой работе испытания на изгиб проведены по четырехточечной схеме. В процессе испытаний регистрировались значения перерезывающих сил и прогибов в точках их приложения, а также величина продольной и поперечной деформаций растяжения или сжатия на поверхности образца в месте наи-



Таблица 1

Результаты испытаний на растяжение образцов с покрытиями  
и экспериментальные значения модуля упругости исследуемых покрытий

№ образца	Ширина образца, мм	Толщина образца, мм	Эффективный модуль упругости $E_0$ , $10^5$ МПа	Модуль упругости покрытия, $E_n$ , $10^4$ МПа
1-1	12.2	0.95	1.595	3.27
1-2	12.2	0.95	1.595	3.27
1-3	12.2	0.95	1.605	3.72
1-4	12.2	1.14	1.657	3.58
1-5	12.2	1.14	1.657	3.58
1-6	12.2	1.15	1.655	3.19
1-7	12.2	1.66	1.745	3.72
1-8	12.2	1.66	1.749	3.94
1-9	12.2	1.66	1.745	3.72
1-10	12.2	1.66	1.740	3.29
2-1	12.2	1.66	1.756	4.64
2-2	12.2	1.66	1.727	2.42
2-3	12.2	1.65	1.723	2.21
2-4	12.2	1.65	1.721	1.98

большого прогиба. Деформация измерялась с применением тензодатчиков FLA-2 производства фирмы TML, Япония. База датчиков составляла 2 мм, сопротивление — 120 Ом. Датчики по полумостовой схеме подключались к цифровому усилителю типа Spider-8. Сигнал с тензоусилителя подавался на персональный компьютер для регистрации и автоматической обработки. Прогибы определялись по перемещению траверсы установки Zwick Z100. Изгибающая сила регистрировалась с использованием стандартной системы измерения испытательной машины. Для получения расчетных значений деформации покрытий при изгибе полос с покрытиями использованы основные соотношения теории изгиба балок постоянного сечения [4]. В соответствии с этими соотношениями изгибающий момент  $M$  в центральной части изгибаемого образца между опорами можно представить в виде суммы:

$$M = \frac{Pl}{2} = M_n + M_{ст}, \quad (2)$$

где  $M_n$  — часть момента, приходящаяся на покрытие,  $M_{ст}$  — часть момента, соответствующая сопротивлению стальной полосы;  $P$  — изгибающая сила;  $l$  — расстояние между опорами. В то же время для  $M$ ,  $M_n$  и  $M_{ст}$  можно записать:

$$M = \frac{E_0^n J_0}{R} = \frac{E_n J_n}{R} + \frac{E_{ст} J_{ст}}{R}, \quad (3)$$

где  $E_0^n$  — эффективный изгибный модуль,  $E_{ст}$  и  $E_n$  — значения модуля упругости стали и покрытия;  $J_0$ ,  $J_n$ ,  $J_{ст}$  — моменты инерции полного поперечного сечения образца, слоя покрытия и стали соответственно;  $R$  — радиус кривизны изогнутого образца.

С учетом (2) и (3) для  $E_0$  и  $E_{ст}$  можно записать следующие соотношения:

$$E_n = E_0 \frac{J_0}{J_n} - E_{ст} \frac{J_{ст}}{J_n}, \quad E_0 = \frac{Pl}{2\varepsilon W_0},$$

где  $W_0$  и  $\varepsilon$  — момент сопротивления поперечного сечения образца и экспериментально определенное значение продольной деформации в середине образца.

Известно, что экспериментальные значения модуля упругости стали, определенные в условиях растяжения и изгиба, могут различаться. В этой связи были проведены испытания на изгиб образцов стали 08-ПС без покрытия для уточнения значения модуля упругости материала при изгибе. Испытания стальных образцов проведены также по схеме четырехточечного изгиба по методике, принятой



для испытаний образцов с покрытиями. Модуль упругости определялся в соответствии с известными рекомендациями [4]. Среднее значение модуля упругости стали, определенное в условиях изгиба, составляет  $1.79 \cdot 10^5$  МПа при среднеквадратичном отклонении  $0.6 \cdot 10^4$  МПа.

В табл. 2 и 3 представлены значения модуля упругости покрытий № 1 и № 2, определенные по результатам испытаний образцов с покрытиями на изгиб. Средние значения модуля упругости этих покрытий по данным испытаний на изгиб составляют  $2.03 \cdot 10^4$  МПа для покрытия № 1 и  $1.58 \cdot 10^4$  МПа для покрытия № 2 при среднеквадратичных отклонения  $0.62 \cdot 10^4$  МПа и  $1.1 \cdot 10^4$  МПа. Эти значения вполне удовлетворительно согласуются с данными, полученными по результатам испытаний на растяжение:  $3.53 \cdot 10^4$  МПа и  $2.81 \cdot 10^4$  МПа.

Таблица 2

Результаты определения модуля упругости покрытия № 1 по данным испытаний на изгиб

№ образца	P, Н	$\varepsilon, 10^{-3}$	$E_0, 10^5$ МПа	$E_n, 10^4$ МПа
1-1С	20.5	-0.523	1.238	1.37
	41.8	-1.054	1.252	2.18
1-1Р	20.7	0.515	1.267	2.27
	41.5	1.026	1.279	2.62
1-2С	20.9	-0.538	1.309	3.51
	42	-1.069	1.241	1.47
1-2Р	20.3	0.51	1.26	2.04
	41.5	1.044	1.236	1.31
1-3С	21	-0.535	1.241	1.48
	42.4	-1.064	1.259	2.01
1-3Р	20.4	0.513	1.255	1.88
	41.4	1.032	1.267	2.25

Таблица 3

Результаты определения модуля упругости покрытия № 2 по данным испытаний на изгиб

№ образца	P, Н	$\varepsilon, 10^{-3}$	$E_0, 10^5$ МПа	$E_n, 10^4$ МПа
2-1С	17.5	-0.456	1.211	1.09
	37.4	-0.978	1.21	1.06
2-1Р	18	0.428	1.326	4.55
	38	0.924	1.3	3.25
2-2С	19.9	-0.516	1.218	1.3
	40	-1.039	1.219	1.33
2-2Р	18.8	0.462	1.286	2.82
	38.8	0.959	1.279	2.61
2-3С	17.7	-0.46	1.217	1.27
	38.1	-0.984	1.224	1.48
2-3Р	17.9	0.464	1.222	1.36
	38.1	0.984	1.222	1.36

Методика определения коэффициента Пуассона покрытия основана на использовании результатов измерений продольной и поперечной деформации на поверхности покрытия в процессе испытаний на изгиб и численной модели изгиба трехслойного образца. Конечноэлементная модель изгиба образца разработана с использованием коммерческого программного комплекса PATRAN/NASTRAN. Для сокращения объема вычислений было использовано свойство симметрии принятой схемы нагружения, что дало возможность ограничиться рассмотрением лишь половины образца с заданными силами. Отброшенная часть в этом случае заменилась соответствующими граничными условиями. Разработанная модель содержит 11832 восьмиузловых элементов в виде прямоугольных параллелепипедов.



На рис. 3 представлен график расчетного распределения продольной деформации по толщине слоя покрытия. Следует сказать о линейном характере распределения деформаций и удовлетворительном совпадении расчетных и экспериментальных значений продольной деформации на поверхности образца, свидетельствующих об адекватности разработанной численной модели. Для проведения вычислений принимались экспериментальные значения модулей упругости стали и покрытия, полученные в данной работе. Коэффициент Пуассона стали принимался равным 0.28.

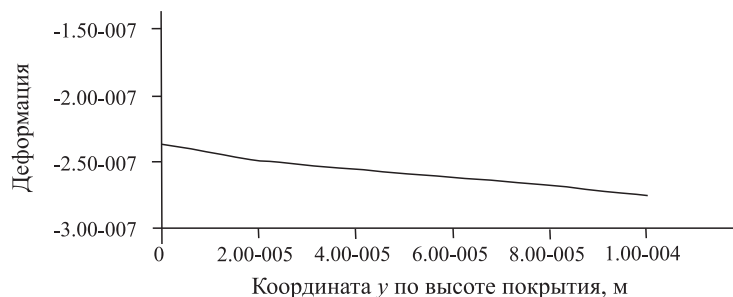


Рис. 3. Расчетное распределение деформации по толщине покрытия

Для определения коэффициента Пуассона покрытий проведено параметрическое исследование разработанной конечноэлементной модели, в процессе которого задавались различные значения коэффициента Пуассона покрытия в пределах от 0.2 до 0.35. Результаты вычислений зависимости отношения расчетных величин поперечной и продольной деформаций от заданного значения коэффициента Пуассона покрытия представлены на рис. 4 (1 — экспериментальное значение отношения поперечной деформации покрытия к продольной, 2 — расчетная зависимость отношения поперечной деформации к продольной деформации покрытия от заданного значения коэффициента Пуассона покрытия). Горизонтальная прямая на этом графике соответствует экспериментальному значению отношения поперечной и продольной деформаций. За истинное значение коэффициента Пуассона покрытия принимается такое, при котором отношение расчетных деформаций совпадает с отношением экспериментальных.

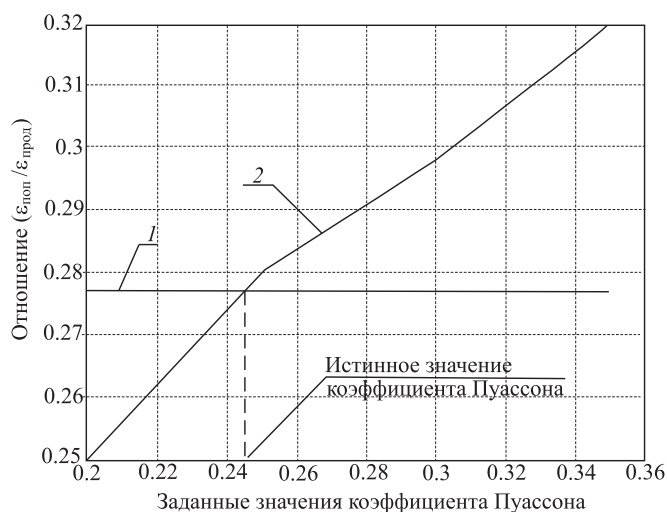


Рис. 4. Иллюстрация к определению коэффициента Пуассона покрытия

Как следует из данных, представленных на рис. 4, полученное значение коэффициента Пуассона покрытия № 1 составляет 0.245. Для покрытия № 2 эта величина составляет 0.238. Различия в значениях коэффициента Пуассона для исследуемых покрытий лежат в пределах неизбежных погрешностей измерений. В этой связи не представляется возможным сделать выводы о влиянии использованной рецептуры покрытия на величину его коэффициента Пуассона.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены два способа определения модуля упругости полимерных покрытий на плоских поверхностях металлических деталей. Оба способа основаны на анализе результатов испытаний на растяжение или изгиб образцов исходного материала и трехслойных образцов с исследуемыми покрытиями. Показано, что оба способа дают близкие оценки модуля упругости полимерных покрытий. По результатам испытаний на растяжение образцов с покрытиями различной рецептуры установлено, что добавление лаков к исходной краске приводит к снижению модуля упругости покрытия. Разработан метод экспериментальной оценки коэффициента Пуассона покрытий, основанный на использовании результатов испытаний на изгиб трехслойных образцов с покрытиями и данных параметрического исследования пространственной конечноэлементной модели изгиба образцов.



## Библиографический список

1. Каверин А. В., Буйских К. П., Семенов Г. Р., Борисов Ю. С., Задворный Е. А. Исследование термической долговечности покрытий для камер сгорания газовых турбин // Проблемы прочности. 1999. № 1. С. 60–67.
2. Лившиц М. Л. Технический анализ и контроль производства лаков и красок. М. : Высш. шк., 1980. 216 с.
3. Румиисский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента : справочное пособие. М. : Наука, 1971. 192 с.
4. Тимошенко С. П. Сопrotивление материалов : в 2 т. Т. 1. М. : Наука, 1965. 364 с.

УДК 539.374

## ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОРТОГОНАЛЬНОСТЬ В НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕРМОУПРУГОСТИ ТРЕТЬЕГО ТИПА (GNIII)

В. А. Ковалев, Ю. Н. Радаев\*

Московский городской университет управления Правительства Москвы

E-mail: vlad\_koval@mail.ru

\*Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва

E-mail: radayev@ipmnet.ru, y.radayev@gmail.com

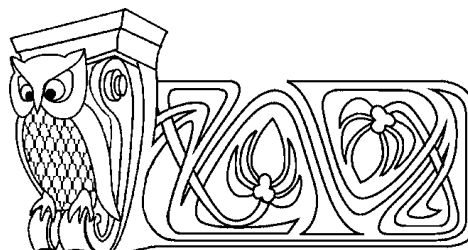
В представляемой работе в рамках модели термоупругого континуума Грина–Нахди GN третьего типа (GNIII, type-III thermoelasticity) получены нелинейные определяющие уравнения термодинамической (термомеханической) ортогональности в «пространстве» термодинамических сил: в связанных процессах термоупругого деформирования и теплопроводности твердых тел термодинамический поток (точнее, его необратимая составляющая), в роли которого выступает референциальный вектор потока энтропии, геометрически ортогонален в «пространстве» референциальных градиентов температурного смещения поверхности уровня потенциала рассеяния. Устанавливается нелинейный определяющий закон теплопроводности в теории GNIII, удовлетворяющий принципу ортогональности термодинамических потоков и сил. Рассматриваются также предельные варианты определяющих законов термоупругости третьего типа: GNI/CTE (type-I thermoelasticity) — стандартная термоупругость, основанная на законе теплопроводности Фурье; GNII (type-II thermoelasticity) — гиперболическая недиссипативная термоупругость, характеризуемая нулевым внутренним производством энтропии в процессах теплопроводности и референциальным потоком энтропии, имеющим только обратимую составляющую.

**Ключевые слова:** термоупругость, принцип максимума, термодинамическая ортогональность, термодинамическая сила, термодинамический поток, определяющий закон.

### 1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

К настоящему времени в ряде областей механики и физики были предприняты успешные попытки выйти за пределы классической линейной термодинамики необратимых процессов. Главная идея новых подходов (extended irreversible thermodynamics) в термодинамике необратимых процессов состоит в расширении числа переменных, представляющих состояние термодинамической системы. В качестве дополнительных переменных состояния при этом выступают обобщенные термодинамические потоки или в двойственных формулировках — обобщенные термодинамические силы<sup>1</sup>. В такой новой поста-

<sup>1</sup>Термодинамическая сила, как правило, определяется в форме пространственного (или отсчетного) градиента стандартной термодинамической переменной состояния. Поэтому расширение списка стандартных термодинамических переменных состояния происходит за счет добавления их градиентов. В этом случае предполагается, что в каждом данном состоянии значения термодинамической переменной состояния и ее градиента являются независимыми и в известном диапазоне произвольными.



## Thermomechanical Orthogonality in Nonlinear Type-III Thermoelasticity (GNIII)

V. A. Kovalev, Yu. N. Radayev

The present paper is devoted to formulations of constitutive equations for the non-linear Green–Naghdi type-III thermoelastic continuum consistent with the principle of thermodynamic (or thermomechanical) orthogonality. The principle of thermodynamic orthogonality proposed by Ziegler as a generalization of the Onsager linear irreversible thermodynamics states that the irreversible constituent parts of thermodynamic currents (velocities) are orthogonal to the convex dissipation potential level surface in the space of thermodynamic forces for any process of heat transport in a solid. The principle of the thermomechanical orthogonality takes its origin from the von Mises maximum principle of the perfect plasticity, where it provides existence of a yield surface, its convexity, and the associated flow rule. Non-linear constitutive laws of heat propagation as of type-III thermoelasticity complying with the principle of thermomechanical orthogonality are discussed. Important for applied thermoelasticity cases covered by type-III theory are studied: GNI/CTE - conventional thermoelasticity based on the Fourier heat conduction law and GNII — dissipationless hyperbolic thermoelasticity. In the latter case the internal entropy production equals zero for any heat transport process having the form of the undamped thermoelastic wave propagating at finite speed.

**Key words:** thermoelasticity, von Mises maximum principle, thermodynamic orthogonality, thermodynamic force, thermodynamic flux, constitutive law.