

УДК 669:539.4.01

В. А. Ермишкин, д-р техн. наук, проф., **Н. А. Минина**, **Н. А. Палий**
(ИМЕТ РАН, Москва, Россия)

Тел./факс: +7(499)1359668/+7(499) 1358680; eva@imet.ac.ru; minina1951@rambler.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТ ПАРАМЕТРА СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Целью настоящей работы является проверка возможности аналитического описания механических свойств металлов и сплавов с параметрами их структурного состояния, определенных по данным измерений с помощью фотометрического анализа их структурных изображений (ФАСИ), разработанного ранее в ИМЕТ РАН.

Ключевые слова: механические свойства материалов, структурное состояние, деформация, фотометрический анализ.

V. A. Yermyskin, N. A. Minina, N. A. Paliy

ANALYTICAL DESCRIPTION OF THE DEPENDENCE OF MECHANICAL PROPERTIES ON THE STRUCTURAL STATE PARAMETER OF METAL ALLOYS

The purpose of this work is to test the possibility of an analytical description of the mechanical properties of metals and alloys with the parameters of their structural state, determined from measurement data using photometric analysis of their structural images (PHASI), previously developed at IMET RAS.

Keywords: mechanical properties of materials, structural state, photometric analysis, deformation.

1. Введение

Существующие методы расчетов на прочность металлических конструкций базируются на представлениях о сплошном строении бесструктурных материалов и на аналитическом описании механических характеристик, определяемых экспериментально по замерам размеров элементов конструкций и их формоизменения в процессе деформирования [1-3]. Они не учитывают современных результатов физического материаловедения о зависимости механических свойств от структурных параметров, описывающих их зависимость от атомно-кристаллического строения материалов, включая дефекты кристаллических решеток [4-10].

2. Исследуемые материалы и методы исследования

Основные предпосылки решения поставленной задачи были проверены в результате экспериментального исследования плоских образцов из монокристаллов, ориентированных в направлении [110], полученных методом электронно-лучевой зонной плавки. Из них с помощью электроискровой резки были получены заготовки образцов, которые прокаткой с последующим шлифованием были доведены до толщины 0,5 мм. Из заготовок были вырезаны образцы с длиной рабочей части 10 мм. на рабочую поверхность, которых были выведены плоскости с нормалью, ориентированной в направлении [001]. После отжига при $T = 800^{\circ}\text{C}$ в течении 30 мин. образцы испытывались растяжением в захватах универсальной испытательной машины Инстрон-3382 со скоростью $\dot{\epsilon} = 2,78 \cdot 10^{-5} \text{ 1/с}$. Образцы деформировались в результате скольжения по системам $\{110\} \langle 111 \rangle$ и разрушались по дислокационно-сдвиговому механизму, установленному ранее. Образцы испытывались методом *in situ*, при котором наряду с непрерывной записью результатов испытания с помощью видеокамеры синхронно записывались результаты наблюдения за структурной эволюцией материала на поверхности об-

разцов. Результаты испытаний были проанализированы покадрово с помощью ФАСИ. Типичная картина такого анализа приведена на рис. 1. На нем в верхней части показаны слева - изображение эталонного фрагмента, роль которого выполняет изображение фрагмента образца до начала его деформирования, справа - размещаются изображения фрагментов из последовательности кадров, выбранных для анализа с помощью ФАСИ. В нижней части рис. 1 показаны спектры яркости отражения видимого света, отраженного от поверхности соответствующих фрагментов исследуемых образцов, которые строятся в координатах «интенсивность - спектральная плотность $\{p(\Delta I)\}$ в выделенных цветом интервалах – спектра - средняя интенсивность отражения в этих интервалах - ΔI ». В ФАСИ предусмотрена возможность выделения различными цветами интервалов, имеющих особенности отражения. В этих интервалах спектральная плотность измеряется по формуле (1):

$$p(I) = \frac{n_i}{N} \tag{1}$$

где: n_i - количество пикселей окрашенных в определенный цвет (i), N - общее количество пикселей, на которое разбито все изображение фрагмента. Средняя интенсивность отражения видимого света от поверхности образца (I) оценивается по формуле (2):

$$I = \frac{\sum_1^n \Delta I_i}{n} \tag{2}$$

где: ΔI_i – интервалы разбиения оси абсцисс, n - количество интервалов разбиения. Интенсивность отражения изменяется в линейной шкале, за нуль, которой принято ее состояние, когда происходит полное поглощение света, а за единицу принято состояние полного отражения света от поверхности образца.

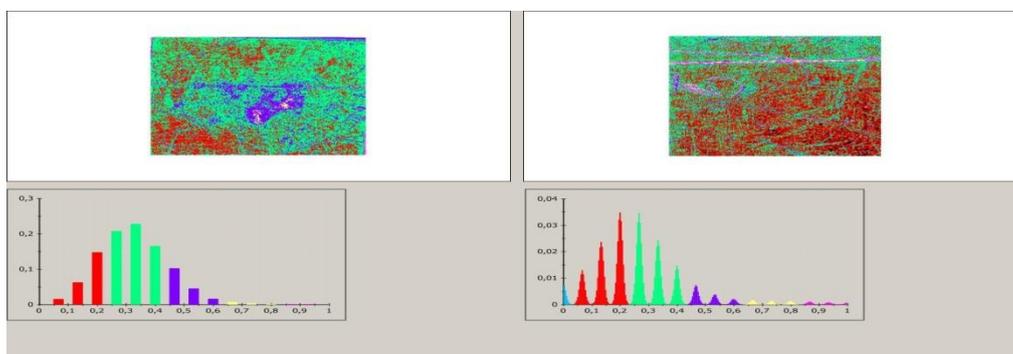


Рисунок 1. Результаты фотометрического анализа структурных изображений фрагмента образца О5 (слева - лицевая сторона (О5л), справа - задняя сторона (О5з) 5л, под структурными изображениями показаны спектры яркости отражения от их поверхности

На рисунке показаны фрагменты образца из монокристалла взятые с двух сторон после прокатки. Результатом покадрового анализа видео записи за эволюцией структуры в средней части на рабочей части образца было формирование массива изображений, составляющих временную последовательность видео фрагментов изображений поверхности в последовательные моменты времени. Из компьютерной записи результатов механических испытаний для этих же моментов времени были выбраны массивы соответствующих фрагментам массивам действующих напряжений и деформаций.

3. Обсуждение полученных результатов

Эксперименты по деформированию макроскопических образцов в условиях *in situ* информация о действующих напряжениях и значения соответствующих им деформаций непрерывно регистрируется в компьютере испытательной машине. Для решения поставленной задачи нужно поставить во взаимно однозначное элементам массивов $\{\sigma_i\}$ и $\{\varepsilon_i\}$ сопряженные с ними по времени значения структурных параметров. Роль обобщенных структурных параметров не могут выполнять известные структурные параметры таких как дефекты кристаллического строения, дисперсные выделения вторичных фаз и мелкие включения металлургического происхождения ввиду различий в их физико-химической природе. Проведенные нами исследования показали, что эту роль может выполнять поток фотонов, отраженных от поверхности исследуемых объектов. Сама их цветная окраска при освещении бесцветным видимым цветом возможна, если на ней происходит поглощение части падающего потока на них светового потока и отражение другой его части. Именно эта часть воспринимается нашими глазами как окраска поверхности объектов и ее можно рассматривать как сигнальную информацию о структурном состоянии поверхности объекта. С учетом того факта, что поглощенная часть светового потока участвует в изменении структурного состояния материала объекта при внешних энергетических воздействиях различной физико-химической природы. Эти воздействия всегда имеют проявления на поверхности исследуемого объекта. Эффект регистрации их воздействия на объект и был положен в основу создания фотометрического анализа структурных изображений. Элементарным актом отражения видимого света является взаимодействие падающих на объект фотонов с валентными электронами. Осциллирующие векторы электрического поля фотонов инициируют поверхностный ток в объекте, который в свою очередь возбуждает излучаемые фотоны электромагнитных волн. Факт излучения фотонов свободными электронами подтверждается излучением света от полированной поверхности эбонита после его электролиза его поверхности трением шерстяной тканью, что было обнаружено методом ФАСИ.

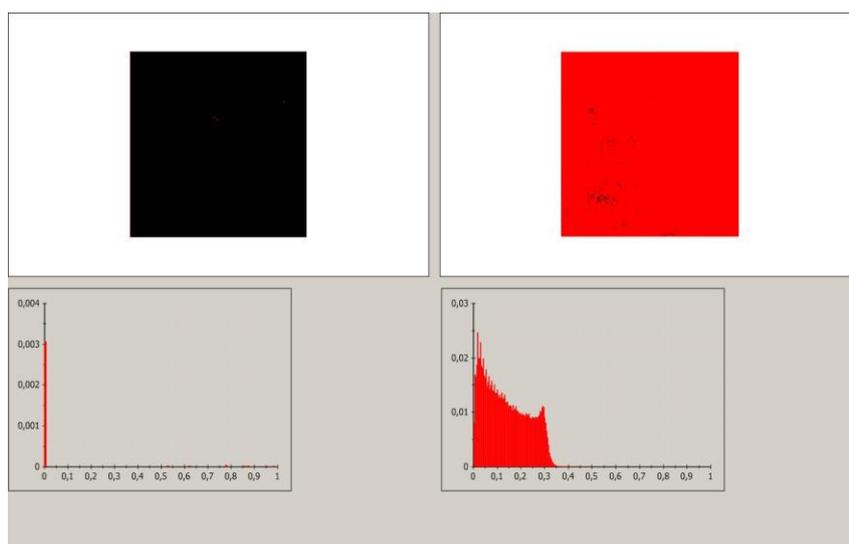


Рисунок. 2. Результат электролиза поверхности полированной поверхности эбонита. Слева – изображение фрагмент поверхности эбонита и спектр яркости отражения видимого света от него, справа – то же, но после электролиза этого фрагмента

В ФАСИ, в процессе анализа кадров видеозаписи результатов экспериментов, фактически воспроизводится ситуация, имеющая место при деформировании образцов. При этом происходит разделение светового потока на отраженную электронными и поглощенную части, которые регистрируются. Поскольку поглощение света происходит на свободных электронах концентрация которых на дефектах существенно выше, что дает возможность измерять концентрации дефектов различной природы. По этой причине в качестве обобщенного структурного фактора в аналитических описаниях физических процессов можно было попробовать использовать поглощенную долю светового потока в качестве обобщенного критерия структурного состояния материалов в аналитическом описании физических и производственных процессах. В настоящей работе этот подход был использован для описания роли структуры в оценки прочности материалов. Его развитию было положено начало исследованием деформирования образцов из монокристаллов молибдена с кристаллогеометрией [110] (001). Механические свойства таких образцов приведены в таблице №1.

Таблица 1. Механические свойства монокристаллических образцов из молибдена

№ образцов	№ испытаний	Механические свойства				Технология обработки
		$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в.}$, МПа	δ	Ψ	
5-1	8	376	417	0,226	0,0112	Прокатка вдоль+ТО
6-1	12	423	470	0,269	0,212	Прокатка вдоль+ТО
6-2	15	424	473	0,084	0,0216	Обработка та же, но $h > \text{мм}$
9-1	18	391	472	0,083	0,077	Прокатка вдоль и поперек+ТО

В таблице №1 приведены данные образцов, которые отличаются предварительной технологической подготовкой и как результат различными механизмами деформирования и характером разрушения. Тем не менее, их прочностные характеристики близки по величине, чего нельзя сказать о показателях пластичности, которые напрямую определяются этими механизмами. Традиционная ориентация на выбор режимов технологической обработки с ориентацией на точечные значения механических характеристик сплавов требует больших финансовых и трудовых затрат на многочисленные варианты обработки. Замена этого подхода на ориентацию на сочетание механических характеристик и соответствующих им структурных параметров. Использование обобщенных структурных параметров позволит сократить объем поисковых исследований.

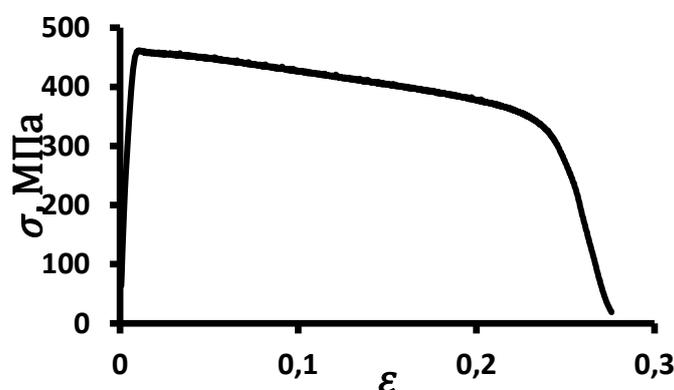


Рисунок 3. Типичная кривая растяжения монокристаллического образца из Мо (обр.6.1')

На основе вышеизложенных соображений были выбраны системы координат для построения, используя информационные массивы $\{\sigma_i\}$, $\{\varepsilon_i\}$ формируется в компьютере испытательной машины. Массив $\{\varphi_i\}$ формируется в системе ФАСИ из последовательности видеок кадров, на которых из отражающих состояние поверхности фрагмента образца в выбранные моменты времени. На рис. 4 показан график в координатах « $\sigma\varphi$ - σ ».

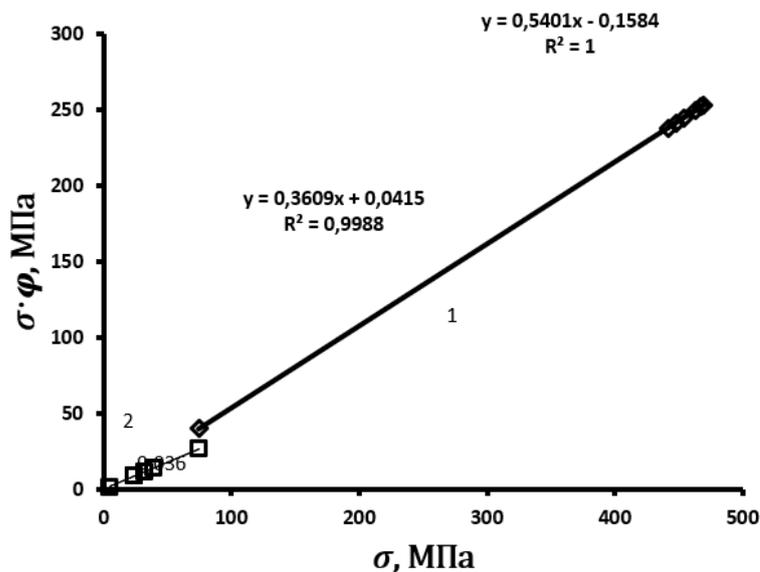


Рисунок 4. Кривая растяжения образца из монокристалла Мо в координатах « $\sigma\varphi$ - σ »: 1 – зависимость построена по данным эксперимента in situ; 2 – зависимость построена по данным рентгеновских измерений

Следует отметить, что результаты экспериментов по растяжению образцов из монокристалла молибдена можно представить в линейной форме в координатах « $\sigma\varphi$ - σ » (рисунок 5).

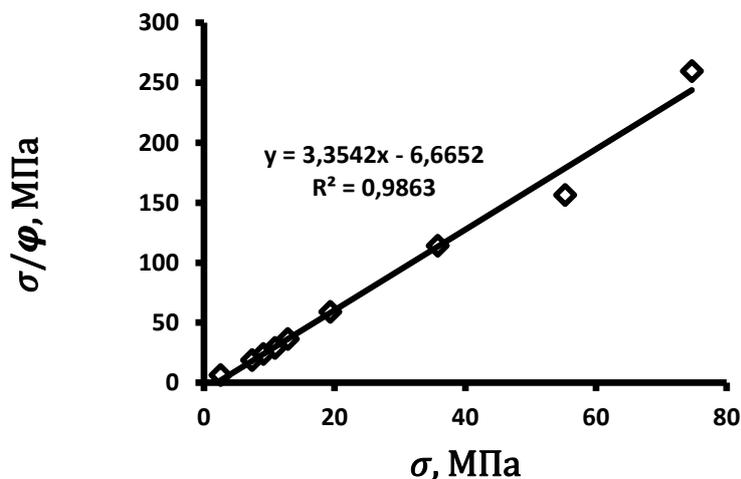


Рисунок 5. Результаты экспериментов по растяжению образцов из монокристалла молибдена

Результаты экспериментов *in situ* образцов из монокристаллов Мо имеет ряд преимуществ перед другими. У нее высокие показатели точности судя по значениям коэффициента репрезентативности (R^2). Линейный характер зависимостей упрощает их аналитическое представление формулой вида $\sigma\varphi = a\sigma + b$. Значения обобщенного структурного фактора φ получают прямым измерением на фрагменте изображения исследуемого образца. Визуализация исследуемого фрагмента для изучения методом ФАСИ возможна любым оптическим приборе: видеокамеры, фотокамеры, оптические, электронные микроскопы (как просвечивающие, так и растровые сканирующие. Объекты исследований готовятся по простым технологиям. Результаты исследования с помощью ФАСИ обладают высокой воспроизводимостью, простотой и получаются высокой производительностью и могут быть получены в любых условиях: лабораторных, стендовых, полигонных. Исследования могут быть выполнены на образцах, натуральных объектах. Параметры напряженно деформированного могут измеряться по фотоматериалам без их разрушения состояния. Измерения выполняются бесконтактным способом. Полученные на образцах, монокристаллах из молибдена, результаты стимулировали их проверку на поликристаллических сплавах, являющихся конструкционными материалами на основе железа, титана и алюминия. Их результаты полностью подтвердили ранее полученные на монокристаллах молибдена. На рис. 6, 7, 8 показаны некоторые результаты на этих материалах.

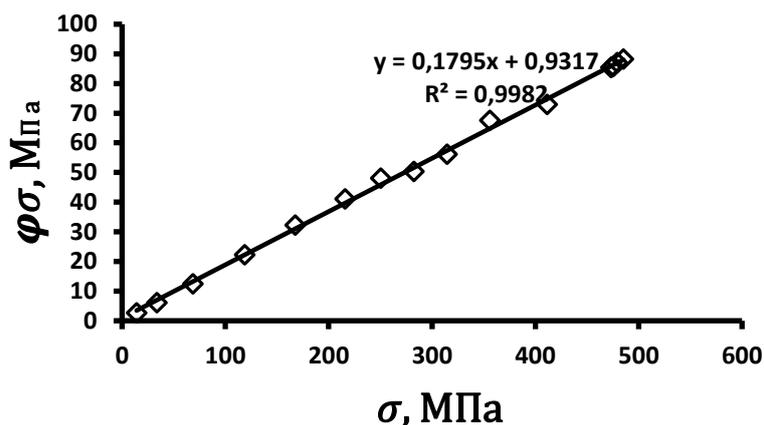


Рисунок 6. Кривая растяжения образца из стали 30ХГСА в координатах « $\sigma\varphi$ - σ »

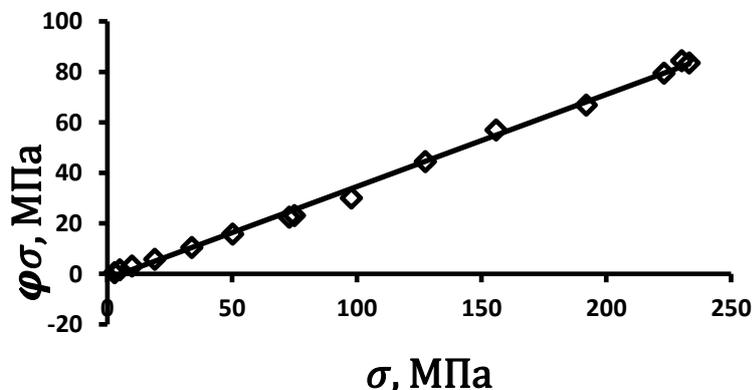


Рисунок 7. Зависимость $\sigma\varphi = f(\sigma)$ для титанового сплава ВТ-18

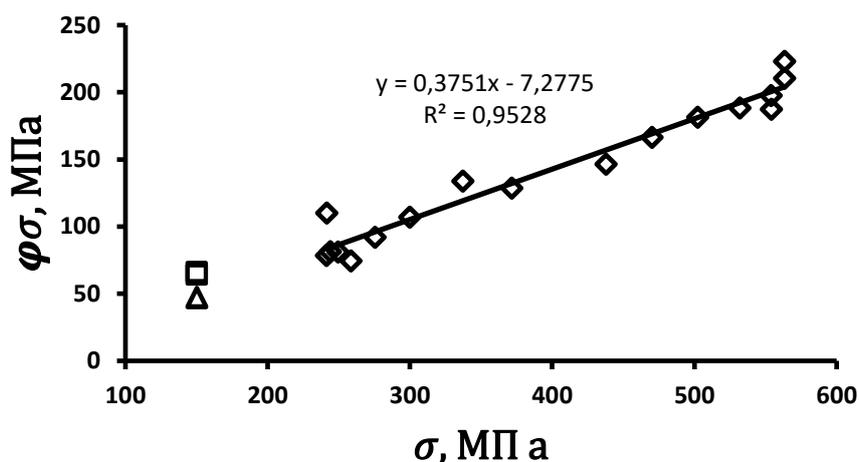


Рисунок. 8. Зависимость $\varphi\sigma = f(\sigma)$ для алюминиевого сплава В95

Из рисунков 6 – 8 видно, что образцы из конструкционных сплавов на основе железа, титана и алюминия в поликристаллическом состоянии при деформировании растяжением подчиняются тем же закономерностям, что и образцы из монокристаллов из молибдена. Таким образом, деформирование поликристаллических образцов из наиболее распространенных сплавов с ОЦК, ГЦК и ГПУ кристаллическими решетками подчиняются общим закономерностям, установленных нами на монокристаллах молибдена. В таблице 2 приведены химические составы сплавов в поликристаллическом состоянии.

Таблица 2. Химические составы выбранных сплавов (масс. %)

Сплав	Fe	Si	Cr	Mn	C	Cu	Ni	Al	Mo	Nb	Zn	Ti	N	H	P
30ХГСА	95,7	0,9-1,2	0,8-1,1	0,8-1,1	0,28-0,3	<0,3	<0,3								0,025
ВТ-18	<0,15	0,5-1,0	0,8-1,1		<0,1				0,2-1,0	0,5-1,5		76,82	<0,05	0,015	
В95	0,5	0,5	0,1-0,25	0,2-0,6		1,4-2		93,2			5-7				<0,05

Основным результатом проведенных исследований было установление формулы, описывающей связь между механическими характеристиками сплавов и монокристаллов молибдена с обобщенным структурным фактором, численно равным площади под спектральной кривой интенсивности падающего светового потока, аккумулированного в образцах, деформируемых образцах (φ). В таблице 3 приведены формулы взаимосвязи механических характеристик исследованных материалов с их обобщенными структурными факторами.

Таблица 3. Связь механических характеристик с их обобщенными структурными факторами

Марки сплавов	Формулы связи	Кристалл. решетки	φ	R ²
Mo	$\sigma\varphi = 3,351\sigma - 6,665$	ОЦК	0,481	0,986
30ХГСА	$\sigma\varphi = 0,179\sigma + 0,931$	ОЦК	0,203	0,998
18ВТ	$\sigma\varphi = 0,364\sigma - 1,905$	ГПУ	0,358	0,996
В95	$\sigma\varphi = 0,375\sigma - 7,277$	ГЦК	0,222	0,952
30ХГСА	$\varepsilon\varphi = \exp(-5) + 6\exp(-5)$	ОЦК	0,203	0,977

Следует отметить, что представление зависимости $\varepsilon\varphi = f(\sigma)$ прямой линией совершенно аналогично зависимости $\varphi\sigma = f(\sigma)$, что было подтверждено анализом результатов эксперимента по растяжению образцов стали 30ХГСА.

4. Заключение

Результаты растяжения образцов из конструкционных сплавов на основе Fe, Ti и Al при их анализе методом ФАСИ приводят к линейной зависимости, аналогичной той, которая ранее (в 2021г) на монокристаллах молибдена.

Разработан критерий, который в обобщенном виде описывает структурные особенности материалов, численно равный той части площади под спектральной кривой, которая соответствует аккумулярованной части энергии спектра светового потока, падающего на образец.

Вид зависимости механических характеристик от обобщенного структурного фактора φ не зависит от вида кристаллической решетки металлов, послуживший основой для конструкционных сплавов.

Работа выполнена по Государственному заданию № 075-00320-24-00.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. Киев: Наукова думка, 1972. - 508 с.
2. Новицкий В. Теория упругости. Пер.с польск. М. Мир. 1975г. 872с.
3. Ляв А. Е. Математическая теория упругости ОНТИ 1935 672 с.
4. И. И. Новиков, В. А. Ермишкин, В. С. Гребнева Исследование механизма вязкого разрушения монокристаллов молибдена методом высоковольтной электронной микроскопии - Физика твердого тела Т 25, №7, 1983 С. 2096-2104
5. Новиков И. И., Ермишкин В. А. Физическая механика реальных материалов. М.: Наука, 2004. - 328 с.
6. Новиков И. И., Ермишкин В. А. Микромеханизмы разрушения металлов - Москва: Наука, 1991. – 365 с.
7. Ермишкин В. А., Лепешкин Ю. Д., Мурат Д. П., Овчинников И. Н. «Способ фотометрической диагностики структурного состояния материалов по данным анализа цифрового кодированного изображения их поверхности». Патент №2387974, 2010. Бюл. № 12.
8. Ермишкин В. А., Минина Н. А., Федотова Н. Л. «Способ фотометрической диагностики фазовых превращений в твердых телах по данным анализа спектров яркости отражения света от их поверхности», Патент №2387978, 2010. Бюл. №12.
9. В. Шмидт Оптическая спектроскопия для химиков и биологов пер. с англ. Москва: Техносфера, 2007. - 363 с.
- 10 Косевич А. М. Теория кристаллической решетки (физическая механика кристаллов). Учебное пособие для студентов физических и физико-технических спец. Харьков: Издательство при Харьковском государственном университете издательского объединения "Вища школа", 1988 303 с.

Поступила в редколлегию 08.02.2024 г.