ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/310

**РЕНТГЕНОВСКИЙ МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ МОДУЛЯ
УПРУГОСТИ В МАТЕРИАЛАХ С ГРАДИЕНТНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ
СТРУКТУРЫ**

¹Остапенко М.Г., ^{1,2}Мейснер Л.Л.

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики
прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*

Результаты исследований, связанные с оценкой и сравнением величин остаточных упругих напряжений, полученных для одних и тех же материалов структурными (рентгеновская дифрактометрия) и механическими методами, показывают, что эти значения коррелируют между собой [1]. Наиболее близкие значения этих напряжений получаются тогда, когда в рентгеновских расчетах учитывается тензорный характер упругих свойств и ориентация плоскости отражения относительно нормали к плоскости поверхности. В то же время возникает вопрос, какие значения упругих констант наиболее приемлемы для определения напряжений рентгеновскими методами. Особенно сложно ответить на эти вопросы в тех случаях, когда внешние воздействия приводят к градиентному изменению химического состава и микроструктуры материала.

Цель данной работы – разработать методический подход с использованием рентгеновских методов для количественной оценки величины модуля упругости в материалах с градиентным изменением параметров структуры и сопоставить полученные результаты с данными по наноиндентированию.

В основу разрабатываемого метода оценки модуля упругости в материалах с градиентным изменением параметров структуры легли рассуждения, что каждый кристаллит ведет себя так, как если бы он был деформирован независимо от своих соседей. Тогда, для оценки модуля упругости $E(hkl, \psi)$ можно воспользоваться известным [2,3,4] выражением:

$$E_{\psi}^{hkl} = \frac{1}{F^{hkl}} \quad (1),$$

где F^{hkl} – фактор упругих напряжений, угол ψ – угол между направлением падающего рентгеновского луча с перпендикуляром к поверхности образца [2]. В предположении изотропности механических свойств для кристаллов с кубической структурой F^{hkl} имеет вид:

$$F^{hkl} = (2S_1^{hkl} + \frac{1}{2}S_2^{hkl} \sin^2 \psi) \quad (2).$$

Здесь S_1^{hkl} и S_2^{hkl} – константы упругости, которые в случае кубической сингонии кристаллической решетки связаны с коэффициентами упругости s_{ij} , определяющими «податливость» материала. Матрица S_{ij} коэффициентов упругости s_{ij} является обратной к матрице C_{ij} модулей упругости c_{ij} [5]. Таким образом, зная константы c_{ij} можно оценить величину упругих напряжений с учетом градиентного изменения модуля упругости E_{ψ}^{hkl} и экспериментально полученной зависимости ε_{ψ}^{hkl} .

Данный подход был использован при расчете модуля упругости для образцов никелида титана после импульсной электронно-пучковой обработки с плотностью энергии в пучке 20 Дж/см² и длительностью одного импульса $\tau=150$ мкс. Выявлено, что при увеличении толщины слоя h значение $E(hkl, \psi)$, рассчитанное с учетом угла скольжения ψ для рефлекса (110) фазы В2 никелида титана, уменьшается от значений ~115 МПа до ~94 МПа. Проведено сравнение значений модуля упругости E_n , полученных на этих же образцах методом наноиндентирования. Показано, что значения $E(hkl, \psi)$ и E_n близки, и имеют одинаковый характер изменения при увеличении толщины анализируемого слоя. Так, при увеличении толщины слоя h значение E_n уменьшается от значений ~95 МПа до ~60 МПа.

Секция 6. Методы и средства неразрушающего контроля материалов и конструкций с иерархической структурой

Таким образом, в данной работе представлен подход, демонстрирующий возможности эффективного использования рентгеновских методов для количественной оценки величины упругих модулей в материалах с градиентным изменением структуры. Кроме того, выявлено, что близки не только сравниваемые значения $E(hkl, \psi)$ и E_n , но и характер их изменения при увеличении толщины анализируемого слоя. С точки зрения практического приложения, применение упругих постоянных, полученных методом наноиндентирования, обеспечивает достоверный результат оценки уровня остаточных упругих напряжений методом рентгеновской дифракции, согласующийся с известными литературными данными [6-8].

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, госзадание (проект) № III.23.2.1.

1. Васильев Д.М., Смирнов Б.И. Некоторые рентгенографические методы изучения пластически деформированных металлов // Успехи физических наук. 1961. Т. LXXII. В.3. С. 503-558.
2. Тейлор А. Рентгеновская металлография. М.: Металлургия, 1965. 663 с.
3. Ch. Genzel, Advances in X-ray analysis (CD-ROM). 44 (2001) 247–256.
4. U. Welzel, J. Ligot, P. Lamparter, A.C. Vermeulen, E.J. Mittemeijer, Applied Crystallography 38 (2005) 1–29.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель; под ред. А.А. Гусева. 4-е изд. М.: Наука, 1978. – 792 с.
6. K.M. Zhang, J.X. Zou, T. Grosdidier, N. Gey, S. Weber, D.Z. Yang, C. Dong, Mechanisms of structural evolutions associated with the high current pulsed electron beam treatment of a NiTi shape memory alloy, J. Vac. Sci. Technol. A: Vac. Surf. Films 25 (1) (2007) 28–36, <https://doi.org/10.1116/1.2388951>.
7. J.X. Zou, T. Grosdidier, K.M. Zhang, C. Dong, S. Weber, Mechanism of surface modifications on a NiTi alloy treated with low energy high current pulsed electron beam, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 43 (3) (2008) 327–331, <https://doi.org/10.1051/epjap:2008072>.
8. Мейснер Л.Л., Лотков А.А., Остапенко М.Г., Гудимова Е.Ю. Анализ методами рентгеновской дифрактометрии градиента внутренних напряжений в никелиде титана после электронно-пучковой обработки поверхности // Физ. мезомех. –2012.–Т.15.–№3.–С.79–90.