АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НИКЕЛЯ С НАПЫЛЕННОЙ ПЛЕНКОЙ АЛЮМИНИЯ ПОСЛЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

ШУШКОВ А. А., БЫКОВ П. В., ВОРОБЬЁВ В. Л., ВАХРУШЕВ А. В., БАЯНКИН В. Я.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

АННОТАЦИЯ. Выполнено исследование и сравнительный анализ механических свойств поверхностных слоев никеля с напыленной пленкой алюминия в зависимости от дозы облучения ионами аргона. Выявлено, что твердость и приведенный модуль упругости при глубине индентирования 400 нм не изменяется и остается постоянной в пределах допустимой ошибки измерений. Однако при глубине проникновения алмазного наконечника 40 нм твердость, приведенный модуль упругости, жесткость образцов, облученных дозой 10^{17} ион/см² значительно увеличиваются.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: механические свойства, наноиндентирование, тонкие пленки, алюминий, никель, ионно-лучевое перемешивание.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из приоритетных задач в Российской Федерации является создание производства интерметаллидов, обладающих улучшенными прочностными, механическими свойствами, позволяющее существенно уменьшить затраты. Интерметаллидные соединения системы Ni-Al все чаще применяются при создании конструкционных материалов [1]. Решение задач повышения долговечности работы, выпускаемых изделий требует применения материалов, способных работать в условиях агрессивных сред, высоких температур, переменных ударных нагрузок [2]. Многие рабочие параметры изделия в основном определяются состоянием поверхностного слоя материала, из которого оно изготовлено. Одним из способов упрочнения металлов и сплавов является метод поверхностного упрочнения, основанный на ионно-лучевом легировании [3 – 6]. Изменение дефектной структуры приповерхностного слоя вследствие образования различного рода дефектов во время ионного облучения способствует повышению сопротивления движения дислокаций при деформациях, что является одним из механизмов повышения твердости [7, 8].

Формирование интерметаллидных структур в нанокристаллическом состоянии в поверхностных слоях металлических материалов может быть успешно реализовано при воздействии на поверхность высокоинтенсивных пучков ионов металлов [2]. Кроме того, ионное перемешивание, основанное на внедрении требуемой примеси из поверхностных слоев при передаче им кинетической энергии первичного пучка, имеет большие перспективы для получения новых структур и соединений с заданными свойствами [9].

Дальнейшей задачей является применение метода полного факторного эксперимента при проведении испытаний для нахождения значений энергии ионов, дозы облучения и плотности ионного тока, при которых механические характеристики покрытий максимальны, сохраняя при этом пластичность. Это позволит в разы сократить число проводимых испытаний, сэкономить деньги и затрачиваемое время на решение поставленных задач.

Самым распространенным способом измерения механических свойств микро- и наноматериалов, а также приповерхностных слоев является метод наноиндентирования, у которого есть недостатки, особенно в области малых глубин проникновения алмазного наконечника [10 – 13].

Целью настоящей работы является анализ изменения механических характеристик (твердость, приведенный модуль упругости, жесткость, индекс пластичности и др.) поверхностных слоев никеля с напылённой пленкой алюминия (Al/Ni) в зависимости от дозы облучения ионами аргона.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемые образцы представляли собой никелевые пластины размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и толщиной около 50 мкм. Поверхность образцов механически полировалась. После полировки образцы очищались в органических растворителях в ультразвуковой ванне. Пленки алюминия, толщиной 20 нм, на поверхность никелевых образцов осаждались магнетронным способом на установке «Катод-1М» в среде аргона при постоянном токе и температуре подложки 200 °С. Остаточное давление в камере напыления составляло 10^{-4} Па. Ионно-лучевое перемешивание пленок алюминия проводили бомбардировкой ионами аргона, на ионно-лучевой установке «Пион-1М», в импульсно-периодическом режиме ($f = 100 \text{ Гц}$, $t = 1 \text{ мс}$) с энергией ионов 40 кэВ, плотностью тока в импульсе 3 мА/см² и дозами облучения $5 \cdot 10^{15}$ ион/см², 10^{16} ион/см², $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² и 10^{17} ион/см². В процессе имплантации с помощью термопары контролировалась температура образцов, их разогрев не превышал 180÷190 °С.

Испытания по определению физико-механических свойств проводились на комплексной системе измерений и исследований в наномасштабе Micro Materials Ltd Nanotest 600, с использованием индентора Берковича (трехгранная алмазная пирамида с углом при вершине 65.3° и радиусом закругления около 200 нм) в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002). Расчет твердости и приведенного модуля упругости проводились в соответствии с методикой, предложенной Оливером - Фарром [14]. Твердость и модуль упругости определяются по анализу кривой разгрузки и глубине отпечатка, на основе получаемой в процессе испытаний диаграммы нагрузки-разгрузки внедрения алмазного индентора.

Исследованы образцы при максимальной глубине проникновения алмазного наконечника 400 нм и 40 нм. Проведено по 20 измерений методом индентирования каждого образца на заданную из двух глубин проникновения алмазного наконечника. Так как проективный пробег ионов аргона с энергией 40 кэВ в алюминии составляет $\approx 36 \text{ нм}$ [15], то актуальными представлялись результаты на этой или меньшей глубине проникновения алмазного наконечника. Однако на таких глубинах погрешность определения механических характеристик довольно высока. Поэтому принято решение провести дополнительные измерения на глубину индентирования 400 нм, при которой точность измерений не вызывает сомнения.

Начальные условия для глубины проникновения 400 нм: максимальная прикладываемая сила $F - 20 \text{ мН}$, максимальная глубина проникновения алмазного наконечника в образец $h_{\text{max}} - 400 \text{ нм}$. Время нагрузки и разгрузки точки индентирования $t - 20 \text{ с}$. Время задержки при максимальной силе нагружения $t_3 - 10 \text{ с}$. Расстояние между точками индентирования – 25 мкм.

Начальные условия для максимальной глубины проникновения алмазного наконечника $h_{\text{max}} 1 - 40 \text{ нм}$: максимальная прикладываемая сила $F - 1.5 \text{ мН}$, время нагрузки и разгрузки точки индентирования – 10 с. Время задержки при максимальной силе нагружения – 10 с.

Расстояние между точками индентирования – 15 мкм. Начальные условия были заданы таким образом, что при достижении заданной глубины проникновения алмазного наконечника соответственно 40 и 400 нм контакт индентора с образцом прекращался, независимо от значения силы F .

Параметр индекса пластичности PI (Plasticity Index) рассчитывался как отношение величины работы, затрачиваемой на формирование пластической деформации к общей работе.

Параметр упругого восстановления ERP (Elastic recovery parameter) рассчитывался как отношение разности максимальной и пластической глубин к пластической глубине проникновения алмазного индентора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 показано, что на глубине индентирования 400 нм не заметны следы облучения ионами аргонами, как глубина, так и прикладываемая сила практически одинаковы для образца Al/Ni в исходном состоянии и образца Al/Ni, облученного ионами аргона дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см². Тонкая пленка алюминия толщиной 20 нм пробивается алмазным наконечником за 2 секунды и не заметен прирост увеличения твердости и приведенного модуля упругости на этих глубинах (рис. 2, 3). Величина ошибки, показанной на всех рисунках, является среднеквадратичным отклонением.

Рис. 1. Зависимость прикладываемой силы F , мН от глубины проникновения алмазного наконечника h , нм в образец для нагрузки 20 мН, 20 точек индентирования:

a) исходное состояние Al/Ni; *б)* Al/Ni $5 \cdot 10^{16}$ ион/см².

Глубина проникновения алмазного индентора – 400 нм

Рис. 2. Зависимость среднего значения твердости H , ГПа от дозы облучения ионами аргона, при максимальной глубине индентирования 400 нм

Рис. 3. Зависимость среднего значения приведенного модуля упругости E_r , ГПа от дозы облучения ионами аргона, при максимальной глубине индентирования 400 нм

Однако при глубине проникновения алмазного индентора 40 нм наблюдается уже другая картина. Твердость и приведенный модуль упругости значительно увеличиваются (рис. 4, 5).

Рис. 4. Значения твердости H , ГПа для образцов Al/Ni в исходном состоянии – ● и Al/Ni облученного ионами аргона дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² – ■ при максимальной глубине индентирования 40 нм. N – номер опыта

Рис. 5. Значение приведенного модуля упругости E_r , ГПа в различных точках образцов Al/Ni в исходном состоянии – ● и Al/Ni облученного ионами аргона дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² – ■ при максимальной глубине индентирования 40 нм. N – номер опыта

На рис. 6, 7 представлены зависимости среднего значения твердости и приведенного модуля упругости интерметаллидов от дозы ионного облучения.

Рис. 6. Зависимость среднего значения твердости H , ГПа от дозы облучения ионами аргона, при максимальной глубине индентирования 40 нм

Рис. 7. Зависимость среднего значения приведенного модуля упругости E_r , ГПа от дозы облучения ионами аргона, при максимальной глубине индентирования 40 нм

Видно, что среднее значение твердости образца Al/Ni, облученного ионами аргона дозой 10^{17} ион/см² увеличилось на 89 %, приведенный модуль упругости образца Al/Ni, облученного ионами аргона дозой $5 \cdot 10^{16}$ на 116,4 %, по сравнению с исходным состоянием Al/Ni.

Если, к примеру, взять расстояние между атомами 0,25 нм, то глубина проникновения 40 нм будет соответствовать 160 межатомным расстояниям. На таких глубинах проникновения алмазного наконечника может наблюдаться очень большая погрешность

измерений (рис. 6 – 8). На рис. 8 представлена зависимость среднего значения податливости контакта (обратная величина жесткости) от дозы ионного облучения для максимальной глубины индентирования 40 нм.

Рис. 8. Зависимость среднего значения податливости контакта C , нм/мН от дозы облучения ионами аргона, при максимальной глубине индентирования 40 нм

Таким образом, среднее значение жесткости контакта образца Al/Ni, облученного ионами аргона дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² увеличилось на 162 % по сравнению с Al/Ni в исходном состоянии.

На рис. 9 представлена зависимость отношения твердости материала H к его приведенному модулю упругости Юнга E_r (H/E_r) от дозы ионного облучения D , ион/см² при максимальной глубине индентирования 40 нм.

Рис. 9. Зависимость отношения твердости H , ГПа к приведенному модулю упругости E_r (ГПа) от дозы облучения ионами аргона, при максимальной глубине индентирования 40 нм

Отношение твердости материала H к его приведенному модулю упругости Юнга E_r (H/E_r) удобно применять для быстрой и эффективной оценки степени упрочнения материалов. Величина H/E_r характеризует способность материала изменять свою форму и размер в процессе деформации, а также может служить качественной сравнительной характеристикой сопротивления материалов деформации при механическом нагружении, таким образом отображать его структурное состояние [16].

Степень упрочнения образцов Al/Ni, облученных ионами аргона дозами $5 \cdot 10^{15}$ и 10^{17} ион/см² практически не увеличивается по сравнению с образцом Al/Ni в исходном состоянии, а образцов Al/Ni, облученных ионами аргона дозами 10^{16} и $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² уменьшается на 20 и 32 %.

На рис. 10 представлена зависимость упругого параметра восстановления материала ERP от дозы облучения ионами аргона при максимальной глубине индентирования 40 нм. Упругое восстановление проявляется при индентировании в уменьшении размеров отпечатка.

Высокие значения упругого восстановления соответствуют:

- повышенной релаксационной способности материала, особенно релаксации напряжений при циклических нагрузках, обеспечивающей эффективное сопротивление усталостному разрушению;
- высоким демпфирующим свойствам материала, связанным с диссипацией (рассеиванием) накапливаемой энергии в условиях эксплуатационных нагрузок;
- высокому резильянсу материала (способностью запасать упругую энергию и под действием нагрузки упруго деформироваться без разрушения);
- снижению динамической напряженности фрикционного контакта в условиях трения и износа.

Необходимыми условиями повышенной износостойкости покрытий являются максимальные значения стойкости к упругой деформации, стойкости к пластической деформации, упругого восстановления [17].

Рис. 10. Зависимость упругого параметра восстановления ERP от дозы облучения ионами аргона, при максимальной глубине индентирования 40 нм

Особенный интерес представляет образец Al/Ni, облученный ионами аргона дозой 10^{17} ион/см², который несмотря на большее значение твердости по сравнению с другими дозами облучения и необлученным образцом обладает такой же стойкостью к упругой деформации и соответственно износостойкостью и таким же сопротивлением материала деформации при механическом нагружении.

На рис. 11 представлена зависимость индекса пластичности от дозы ионного облучения при максимальной глубине индентирования 40 нм.

Рис. 11. Зависимость индекса пластичности PI от дозы облучения ионами аргона, при максимальной глубине проникновения индентирования 40 нм

Индекс пластичности образцов Al/Ni в исходном состоянии и после облучения ионами аргона для всех доз облучения практически одинаков.

ВЫВОДЫ

Выявлено, среднее значение твердости образца Al/Ni, облученного ионами аргона дозой 10^{17} ион/см² увеличилось на 89 %, приведенный модуль упругости образца Al/Ni, облученного ионами аргона дозой $5 \cdot 10^{16}$ на 116 %, по сравнению с исходным состоянием Al/Ni.

Обнаружено, что среднее значение жесткости контакта образца Al/Ni, облученного ионами аргона дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² увеличилось на 162 % по сравнению с Al/Ni в исходном состоянии.

Выявлено, что упрочнения образцов Al/Ni, облученных ионами аргона дозами $5 \cdot 10^{15}$ и 10^{17} ион/см² практически не увеличивается по сравнению с образцом Al/Ni в исходном состоянии, а образцов Al/Ni, облученных ионами аргона дозами 10^{16} и $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² уменьшается на 20 и 32 %.

Обнаружено, что образец Al/Ni, облученный ионами аргона дозой 10^{17} ион/см², сохраняет такую же износостойкость, сопротивление материала деформации при механическом нагружении, как и образец Al/Ni в исходном состоянии, но при этом значение твердости увеличивается на 89 %, а приведенный модуль упругости на 85 %.

Дальнейшей задачей исследования является определение связи химического, фазового состава образцов Al/Ni, облученных ионами аргона с его механическими характеристиками.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ № 121030100002-0 и № 0427-2019-0029.

Исследования выполнялись с использованием оборудования ЦКП "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН, поддержанного Минобрнауки в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" (Уникальный идентификатор проекта – RFMEFI62119X0035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковтун А. И., Мямин С. В. Интерметаллидные сплавы. Электронное учебное пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2018. 77 с.
2. Курзина И. А., Шаркеев Ю. П., Козлов Э. В. Формирование наноинтерметаллидных фаз в условиях ионной имплантации // В кн.: Структура и свойства перспективных металлических материалов / под. ред. А.И. Потекаева. Томск: Издательство научно-технической литературы, 2007. С. 159-195.
3. Legostaeva A. E., Sharkeev Yu. P. Regularities and mechanisms of molybdenum ion-implanted ferrite-perlite steel // Трение и износ. 2002. Т. 23, № 5. С. 529-536.
4. Lavrent'ev V. I., Pogrebnyak A. D. An influence of ion beams upon iron and steels // Металлофизика и новейшие технологии. 1996. Т. 18, № 11. С. 18-39.
5. Плешивцев Н. В., Красиков Е. А. Защита от коррозии металлов, сплавов и сталей ионной бомбардировкой (обзор) // Металлы. 1995. № 4. С. 98-129.
6. Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. М.: Металлургия, 1990. 216 с.
7. Шушков А. А., Воробьев В. Л., Вахрушев А. В., Быков П. В., Баянкин В. Я. Механические свойства углеродистой стали Ст.3, облученной ионами аргона с различными плотностями ионного тока // Химическая физика и мезоскопия. 2012. Т. 14, № 1. С. 97-105.
8. Воробьев В. Л., Быков П. В., Баянкин В. Я., Шушков А. А., Вахрушев А. В., Орлова Н. А. Изменение механических свойств углеродистой стали Ст.3 в зависимости от средней плотности тока в пучке при импульсном облучении ионами аргона // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 6. С. 5-9.
9. Воробьев В. Л., Климов И. Н., Колотов А. А., Быков П. В., Баянкин В. Я. Формирование интерметаллидов никель-алюминий при ионно-лучевом перемешивании // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. № 12. С. 50-55. <https://doi.org/10.1134/S1028096019120355>
10. Шушков А. А., Вахрушев А. В. Методы определения механических свойств наноструктур // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 1. С. 57-71.
11. Вахрушев А. В., Федотов А. Ю., Вахрушев А. А., Шушков А. А., Шушков А. В. Исследование механизмов формирования наночастиц металлов, определение механических и структурных характеристик нанообъектов и композиционных материалов на их основе // Химическая физика и мезоскопия. 2010. Т. 12, № 4. С. 486-495.
12. Вахрушев А. В., Шушков А. А. Способ определения модуля упругости Юнга и коэффициента Пуассона материала микро- и наночастиц // Патент РФ № 2297617, 2007.
13. Вахрушев А. А., Федотов А. Ю., Шушков А. А., Шушков А. В. Моделирование формирования наночастиц металлов, исследование структурных, физико-механических свойств наночастиц и нанокомпозитов // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2011. № 2. С. 241-253.
14. Oliver W., Pharr G. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments // Journal of Materials Research, 1992, vol. 7, iss. 6, pp. 1564-1583.
15. Кумахов М. А., Комаров Ф. Ф. Энергетические потери и пробеги ионов в твердых телах. Минск: Изд-во БГУ, 1979. 319 с.
16. Хохлова Ю. А., Ищенко Д. А., Хохлов М. А. Индентирование от макро- до нанометрового уровня и примеры исследований свойств материалов с особой структурой // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2017. № 1. С. 30-36.

Analysis of Mechanical Characteristics of Surface Layers of Nickel with a Sputtered Aluminum Film after Ion-Beam Mixing

Shushkov A. A., Bykov P. V., Vorob'ev V. L., Vakhrushev A. V., Bayankin V. Ya.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

SUMMARY. A study and comparative analysis of the mechanical properties of the surface layers of nickel with a sputtered aluminum film, depending on the dose of argon ion irradiation, was performed. It is revealed that the hardness and the reduced modulus of elasticity at the indentation depth of 400 nm does not change and remains constant within the permissible measurement error. However, when the penetration depth of the diamond tip is 40 nm, the hardness, the reduced modulus of elasticity, and the stiffness of the samples irradiated with a dose of 10^{17} ion/cm² increase significantly.

KEYWORDS: mechanical properties, nanoindentation, thin films, aluminum, nickel, ion-beam mixing.

REFERENCES

1. Kovtun A. I., Myamin S. V. *Intermetallidnye splavy* [Intermetallic alloys]. Elektronnoe uchebnoe posobie. Tolyatti: TGU Publ., 2018. 77 p.
2. Kurzina I. A., Sharkeev Yu. P., Kozlov E. V. Formirovanie nanointermetallidnykh faz v usloviyakh ionnoy implantatsii [Formation of nanointermetallic phases under ion implantation conditions]. V kn.: *Struktura i svoystva perspektivnykh metallicheskih materialov* [Structure and properties of promising metal materials]. Pod. red. A.I. Potekaeva. Tomsk: Izdatel'stvo nauchno-tekhnicheskoy literatury Publ., 2007, pp. 159-195.
3. Legostaeva E. V., Sharkeev Yu. P. Regularities and mechanisms of wear of ferritic-pearlitic steel implanted with molybdenum ions. *Journal of Friction and Wear*, 2002, vol. 23, no. 5, pp. 56-62.
4. Lavrent'yev V. I., Pogrebnyak A. D. An influence of ion beams upon iron and steels. *Metallofizika i noveishie tekhnologii* [Metallophysics and Advanced Technologies], 1996, vol. 18, no. 11, pp. 18-39.
5. Pleshivtsev N. V., Krasikov E. A. Zashchita ot korrozii metallov, splavov i staley ionnoy bombardirovkoj (obzor) [Corrosion protection of metals, alloys and steels by ion bombardment (review)]. *Metally* [Metals], 1995, no. 4, pp. 98-129.
6. Komarov F. F. *Ionnaya implantatsiya v metally* [Ion implantation in metals]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1990. 216 p.
7. Shushkov A. A., Vorobev V. L., Vakhrushev A. V., Bykov P. V., Bayankin V. Ya. Mekhanicheskie svoystva uglerodistoi stali St.3, obluchennoi ionami argona s razlichnymi plotnostyami ionnogo toka [Mechanical properties of carbon steel St.3 irradiated with argon ions with different ion current densities]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2012, vol. 14, no. 1, pp. 97-105.
8. Vorobev V. L., Bykov P. V., Bayankin V. Ya., Shushkov A. A., Vakhrushev A. V., Orlova N. A. Izmenenie mekhanicheskikh svoystv uglerodistoi stali St.3 v zavisimosti ot srednei plotnosti toka v puchke pri impulsnom obluchenii ionami argona [Mechanical properties of carbon steel changes with the beam mean current density under pulsed irradiation with ar ions]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Material Processing], 2012, no. 6, pp. 5-9.
9. Vorob'ev V. L., Klimova I. N., Kolotov A. A., Bykov P. V., Bayankin V. Ya. Formation of a nickel-aluminum intermetallic during ion-beam mixing. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2019, vol. 13, no. 6, pp. 1225-1229. <https://doi.org/10.1134/S1027451019060569>
10. Shushkov A. A., Vakhrushev A. V. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv nanostruktur [Methods of nanostructures mechanical properties determination]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 1, pp. 57-71.

11. Vakhrushev A. V., Fedotov A. Yu., Vakhrushev A. A., Shushkov A. A., Shushkov A. V. Issledovanie mekhanizmov formirovaniya nanochastits metallov, opredelenie mekhanicheskikh i strukturnykh kharakteristik nanoobektov i kompozitsionnykh materialov na ikh osnove [Study of process formation of metal nanoparticles, determination of mechanical and structural parameters of nanoobjects and composites with its]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2010, vol. 12, no. 4, pp. 486-495.
12. Vakhrushev A. V., Shushkov A. A. *Sposob opredeleniya modulya uprugosti Yunga i koeffitsienta Puassona materiala mikro- i nanochastits* [Method for determining Young's modulus of elasticity and Poisson's ratio of material of micro- and nanoparticles]. Patent RU 2297617, 2007.
13. Vakhrushev A. A., Fedotov A. Yu., Shushkov A. A., Shushkov A. V. Modelirovanie formirovaniya nanochastits metallov, issledovanie strukturnykh, fiziko-mekhanicheskikh svoystv nanochastits i nanokompozitov [Modeling the formation of metal nanoparticles, study of the structural, physical and mechanical properties of nanoparticles and nanocomposites]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki* [Bulletin of the Tula State University. Natural Sciences], 2011, no. 2, pp. 241-253.
14. Oliver W., Pharr G. An Improved Technique for Detemining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, vol. 7, iss. 6, pp. 1564-1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
15. Kumakhov M.A., Komarov F.F. *Energeticheskie poteri i probegi ionov v tverdykh telakh* [Energy losses and ion runs in solids]. Minsk: BGU Publ., 1979. 319 p.
16. Khokhlova Yu. A., Ishchenko D. A., Khokhlov M. A. Indentirovanie ot makro- do nano- i primery issledovaniy svoystv materialov s osoboi strukturoi [Indentation from macro- to nanometer level and examples of investigation of properties of materials with a special structure]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii control* [Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing], 2017, no. 1, pp. 30-36. <https://doi.org/10.15407/tdnk2017.01.05>
17. Topolyanskii P. A., Topolyanskii A. P., Ermakov S. A., Kanaev A. T., Biizhanov S. K., Sarsembaeva T. E. Sertifikatsiya materialov i pokrytii po fiziko-mekhanicheskim kharakteristikam poverkhnostnogo sloya [Certification of materials and coatings for physical and mechanical characteristics of the surface layer]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Bulletin of Contemporary Research], 2018, no. 10-1(25), pp. 354-366.

Шушков Андрей Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Отдела моделирования и синтеза технологических структур, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, тел. (3412) 214583, e-mail: ligrim@mail.ru

Быков Павел Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электронной структуры поверхности Отдела физики и химии поверхности, Физико-технический институт УдмФИЦ УрО РАН, тел. (3412) 430675, e-mail: bykovpv@udman.ru

Воробьев Василий Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электронной структуры поверхности Отдела физики и химии поверхности, Физико-технический институт УдмФИЦ УрО РАН, тел. (3412) 431573, e-mail: vasily_l.84@udman.ru

Вахрушев Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Отдела моделирования и синтеза технологических структур, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, тел. (3412) 214583, e-mail: vakhrushev-a@yandex.ru

Баянкин Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории электронной структуры поверхности Отдела физики и химии поверхности, Физико-технический институт УдмФИЦ УрО РАН, тел. (3412) 430173, e-mail: bayankinvya@udman.ru