

# Эффект памяти формы и сверхэластичность сплавов никелида титана, имплантированных высокими дозами ионов

А.Д.Погребняк, С.Н.Братушка, В.М.Береснев, N.Levintant-Zayonts

Сумский государственный университет

40007 Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2, Украина

Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина

61077 Харьков, пл. Свободы, 4, Украина

Институт фундаментальных технологических исследований Польской академии наук

01106 Варшава, ул. А.Пашинского, 56, Польша

Проанализировано современное состояние исследований по ионной имплантации сплавов NiTi, обладающих эффектом памяти формы и сверхэластичностью. Показана возможность успешного использования эффекта памяти формы в различных отраслях производства. Описаны принципы и техника ионной имплантации, а также особенности ее применения в инженерии поверхности как метода модификации поверхностного слоя. Обсуждены наиболее важные свойства сплавов с эффектом памяти формы и проблемы использования ионной имплантации для улучшения таких характеристик их поверхностей, как коррозионная стойкость, коэффициент трения, стойкость к износу и др.

Библиография — 162 ссылки.

## Оглавление

I. Введение	1135
II. Особенности ионной имплантации как способа модификации поверхностных слоев материалов	1136
III. Свойства поверхностного слоя после ионной имплантации	1138
IV. Сплавы с эффектом памяти формы	1140
V. Влияние ионной имплантации на структуру сплавов NiTi, эффект памяти формы и сверхэластичность	1144
VI. Влияние высокой дозы имплантированных ионов на физико-механические свойства сплавов NiTi	1151
VII. Заключение	1156

## I. Введение

Создание новых материалов — одно из ключевых научных направлений, ориентированных на развитие современной техники. Среди используемых материалов выделяют конструкционные и функциональные (с особыми свойствами). Металлические сплавы, обладающие эффектом памяти

формы (ЭПФ), можно считать одновременно и конструкционными, и функциональными материалами. Никелид титана (NiTi) относится к таким материалам.<sup>†</sup> Он обладает уникальными свойствами — эффектом памяти формы и сверхэластичностью. Несмотря на значительное число работ, посвященных исследованию этих свойств, не сложилось единого мнения о механизмах их возникновения, а также о причинах и природе процессов, происходящих на уровне структуры твердых тел. Материал, опубликованный несколько лет назад в специальном выпуске журнала «Scripta Materialia»,<sup>1</sup> касающийся текущего состояния знаний о сплавах с ЭПФ, четко показал расхождение во взглядах авторов по данным вопросам.<sup>‡</sup>

**А.Д.Погребняк (A.D.Pogrebnyak).** Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нанoeлектроники СумГУ. Телефон: + 38(0686)52–9647, e-mail: alexp@i.ua

**С.Н.Братушка (S.N.Bratushka).** Кандидат физико-математических наук, доцент, докторант той же кафедры.

Телефон: + 38(0966)96–4058, e-mail: s\_bratushka@mail.ru

**В.М.Береснев (V.M.Beresnev).** Доктор технических наук, профессор кафедры материалов реакторостроения и физических технологий физико-технического факультета ХНУ.

Телефон: + 38(0506)41–6035, e-mail: Beresnev-scpt@yandex.ru

**N.Levintant-Zayonts.** Адъюнкт ИФТИ ПАН. Телефон:

+ 48(228)26–1281, доб. 261,

e-mail: neonila@ippt.gov.pl

Область научных интересов авторов: материаловедение, модификация поверхности, нанокompозитные покрытия.

<sup>†</sup> Семейство интерметаллических сплавов никеля и титана получило название «нитинолов».

<sup>‡</sup> Это отмечено и редактором данного издания: «Мы предложили ряду ученых выразить свои взгляды по основным проблемам, связанным со сплавами с памятью формы. Их работы отражают иногда противоречивые точки зрения, поэтому мы должны сказать, что, по крайней мере, одна из них не является полностью правильной». Такие слова свидетельствуют не только об интересе к сплавам, обладающим памятью формы, но и о том, что явления и процессы, происходящие в них, все еще не в полной мере поняты и объяснены.

Дата поступления 26 июля 2012 г.

Авторы статьи<sup>117</sup> имитировали агрессивную среду, используя смесь 10 мл HF + 30 мл HNO<sub>3</sub> + 50 мл H<sub>2</sub>O, в которой образцы протравливали в течение 20 с. Как показали результаты ПЭМ-исследований, неимплантированный материал оказался более подвержен коррозии. Сравнение коррозионной стойкости образцов NiTi, имплантированных ионами азота, показало, что наибольшее сопротивление коррозии у образцов, имплантированных дозами 10<sup>17</sup> и 5 · 10<sup>17</sup> ион · см<sup>-2</sup> (E = 100 кэВ). Наблюдаемое увеличение коррозионной стойкости при ионной имплантации авторы связали с образованием поперечных сжимающих напряжений в слое внедрения, но тщательный анализ этого эффекта в данной работе не проводился.

Работа<sup>38</sup> посвящена изучению свойств поверхности имплантата под влиянием агрессивных сред. В ней приведены результаты комплексных исследований физико-химических свойств сплавов NiTi после имплантации ионов титана и молибдена, а также качественные оценки устойчивости модифицированных слоев к коррозии в биологических средах. Авторы исследовали образцы, состоящие из двух или трех компонентов: Ti<sub>49,5</sub>Ni<sub>50,5</sub>, Ti<sub>50</sub>Ni<sub>44</sub>Zr<sub>6</sub>, Ti<sub>40</sub>Ni<sub>50</sub>Zr<sub>10</sub>, Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50-x</sub>Au<sub>x</sub> (x = 1, 5, 10, 15, 20 ат.%), Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50-x</sub>Pd<sub>x</sub> (x = 2, 6, 10 ат.%). Исходные образцы размерами 1 × 1 × 20 мм отжигали в вакууме (10<sup>-3</sup> Па) в течение 1 ч при температуре 1073 К. Образцы полировали алмазной пастой, а затем подвергали полировке смесью 10%-ной хлорной кислоты и 90%-ной уксусной кислоты. Ионную имплантацию проводили, используя имплантер, работающий в импульсном режиме с частотой импульсов 50 Гц. Образцы Ti<sub>49,5</sub>Ni<sub>50,5</sub> имплантировали ионами Ti<sup>+</sup> (D = 10<sup>17</sup> ион · см<sup>-2</sup>, E = 60 кэВ), образцы Ti<sub>50</sub>Ni<sub>44</sub>Zr<sub>6</sub> и Ti<sub>40</sub>Ni<sub>50</sub>Zr<sub>10</sub> — ионами Mo<sup>+</sup> (соответственно D = 2.5 · 10<sup>16</sup> и 2.5 · 10<sup>17</sup> ион · см<sup>-2</sup>, E = 60 кэВ). Качественно коррозионную стойкость оценивали, используя гравиметрический метод. Образцы взвешивали на аналитических весах с точностью ± 10<sup>-5</sup> г, а их линейные размеры определяли при помощи оптического микроскопа с точностью ± 10<sup>-3</sup> мм. Коррозионную стойкость определяли по отношению потери массы образцом

$$\Delta m = m_0 - m_1$$

(m<sub>0</sub> и m<sub>1</sub> — начальное и конечное значения массы образца после каждого измерения) к общей площади поверхности S. Испытания были проведены в агрессивных средах двух типов:

— в 0.99%-ном растворе NaCl;

— в плазме крови (9 г · л<sup>-1</sup> NaCl + 0.42 г · л<sup>-1</sup> KCl + 0.24 г · л<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> + 2 г · л<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> + 2 г · л<sup>-1</sup> глюкозы).

В первой среде образцы оставались при комнатной температуре в течение 1800 ч, а во второй — при 310 К в течение 3442 ч. Массу измеряли через 1, 3, 5, 7 сут, затем через 2, 3, 4, 6, 8 и 12 недель. Испытание в растворе NaCl проводили для имплантированных и неимплантированных образцов — Ti<sub>49,5</sub>Ni<sub>50,5</sub> и Ni<sub>50</sub>Ni<sub>44</sub>Zr<sub>6</sub>. В растворе плазмы крови были исследованы имплантированные и неимплантированные образцы Ni<sub>49,5</sub>Ni<sub>50,5</sub>. Образцы исследовали в течение года, при изучении морфологии их поверхности проводили регулярные измерения массы.

Анализ изменений коррозионной стойкости Δm/S со временем показал, что для всех образцов наблюдается существенная зависимость изменения массы от химического состава, времени пребывания в растворе, а также параметров имплантации (типа и дозы внедренных ионов). При всех вариантах обработки было обнаружено увеличение корро-

зионной стойкости после ионной имплантации. Наилучший эффект достигался после имплантации ионов молибдена в Ti<sub>50</sub>Ni<sub>44</sub>Zr<sub>6</sub> (D<sub>1</sub> = 2.5 · 10<sup>16</sup> и D<sub>2</sub> = 2.5 · 10<sup>17</sup> ион · см<sup>-2</sup>). Коррозионная стойкость имплантированных образцов оказалась почти в два раза выше, чем неимплантированных. Металлографические исследования подтвердили полученные результаты. При изучении неимплантированных образцов при помощи оптического микроскопа на границах зерен наблюдались следы точечной коррозии. На микрофотографиях имплантированных образцов было видно, что состояние поверхности практически не изменилось. Повышение коррозионной стойкости после имплантации авторы объяснили, ссылаясь на результаты исследования химического состава, полученные методом электронной оже-спектроскопии: было показано, что после имплантации ионов титана на поверхности образуется слой оксида толщиной ~ 20 нм, который полностью лишен никеля. У неимплантированных образцов пленка оксидного слоя на поверхности имела толщину ~ 10 нм и содержала ~ 20 ат. % Ni. У имплантированных образцов наблюдалось образование специфического прилегающего подслоя оксида с минимальным содержанием никеля (только на глубине ~ 50 нм от поверхности значения концентрации никеля стало типичным). Авторы пришли к выводу, что решающим фактором повышения коррозионной стойкости является отсутствие (или незначительное содержание) никеля в модифицированном поверхностном слое.<sup>§</sup> Таким образом, в работе<sup>38</sup> подтверждено благоприятное влияние высокой дозы имплантации ионов Ti<sup>+</sup> и Mo<sup>+</sup> на коррозионные свойства сплавов NiTi, что позволяет использовать их в медицине.

Следует обратить внимание и на то, что при указанных дозах имплантации концентрация внедренных ионов составляла не более 1 ат. %, поэтому очевидно, все эффекты улучшения физико-механических свойств связаны с формированием карбонитридных или оксикарбидных слоев, которые служат в качестве защитной прослойки.<sup>157, 158</sup>

## VII. Заключение

Яркими представителями материалов нового поколения являются металлические сплавы с термоупругими мартенситными превращениями и обусловленным ими эффектом памяти формы. Главное место в этом классе материалов занимают сплавы никелида титана, которые характеризуются высокими прочностными и пластическими свойствами, уникальным по величине эффектом (одно- и многократно обратимым) памяти формы, термомеханической и термоциклической надежностью, а также долговечностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, биологической совместимостью. При этом следует отметить простоту химического состава и технологичность как метал-

§ Имплантация ионов титана приводит к обогащению ими поверхностных областей сплава и возникновению барьерных слоев, изолирующих никель от внешней среды. Обнаружено, что в зависимости от предварительной поверхностной обработки NiTi-подложки ионно-модифицированные барьерные слои различались как по химическому составу, так и по толщине. Изменение химического состава проявлялось в виде расслоения приповерхностного объема на наружный и внутренний слои. Наружный слой, почти не содержащий никеля, кроме титана был обогащен кислородом и имел более однородный по глубине химический состав, чем ионно-модифицированный слой, сформированный на NiTi-подложке, обработанной электрохимическим методом.

лургического процесса их получения, так и последующих производственных операций, в том числе с целью формирования проволок, лент, листов, сложных профилей. Этими фактами обусловлены преимущества сплавов NiTi с ЭПФ перед другими материалами и большие перспективы их применения в будущем.

В настоящее время использование сплавов с ЭПФ широко обсуждается, и в литературе можно найти примеры их практического применения. Приведем некоторые из них:

— в промышленном оборудовании: для создания элементов пусковых устройств и приводов (например, для закрытия клапанов резервуаров с жидкостью либо контейнеров с твердыми отходами при превышении заданной температуры или возгорания), в тепловых выключателях, в предохранителях на линиях связи, для изготовления деталей антенн операторов сотовой связи, пишущих датчиков регистраторов, корпусов вентиляторов и др.;

— в автомобилестроении: для создания клапанов, шайб, гасящих вибрации, пусковых механизмов и др.;

— в космической технике: в качестве соединительных элементов и материала для самораскладывающихся антенн, для создания устройств для запуска солнечных батарей и систем интеллектуального изменения геометрии крыла летательного аппарата с целью снижения вибрации;

— в электронике: в микродатчиках, энергопоглощающих устройствах, для изготовления систем контроля температуры и давления;

— в медицине: для изготовления имплантатов, приспособлений для расширения вен, фильтров крови, ортопедических пластин, хирургических зажимов, эндоскопов, стоматологических инструментов и др.

В настоящем обзоре показано, что ионная имплантация существенно влияет на физико-механические свойства материалов с ЭПФ и фазовые превращения в них. При высоких дозах имплантации для образцов или изделий из NiTi наблюдается значительное улучшение физико-механических свойств, а в ряде случаев возможно формирование нанокристаллических слоев на поверхности (либо вблизи поверхности).<sup>50, 159–162</sup> Следует отметить, что к настоящему времени опубликовано относительно небольшое число работ по имплантации в такие материалы ионов металлов, а также двойной имплантации ионов металлов и газов. Учитывая перспективность использования материалов с ЭПФ, можно надеяться на продолжение исследований в этом направлении.

Обзор подготовлен при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины (госбюджетные НИР 0110U001257 и 0112U001382), а также Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт № 16552117087).

Авторы благодарны сотрудникам кафедры материалов реакторостроения и физических технологий физико-технического факультета Харьковского национального университета им. В.Н.Каразина за критические замечания и пожелания.

Авторы признательны Л.Л.Мейснер, А.И.Лоткову, А.А.Нейман (ИФПМ СО РАН, Томск) за любезно представленные оттиски работ по данной тематике.

## Литература

1. J.Van Humbeeck. *Scr. Mater.*, **50**, 179 (2004)
2. J.Van Humbeeck. *Mater. Sci. Eng. A*, **273**, 134 (1999)
3. S.Shabalovskaya, J.Anderegg, J.Van Humbeeck. *Acta Biomater.*, **4**, 447 (2008)
4. B.Raniecki, Ch.Lexcellent. *Eur. J. Mech. A: Solids*, **17**, 185 (1998)
5. X.Zhao, W.Cai, L.Zhao. *Surf. Coat. Technol.*, **155**, 236 (2002)
6. S.Moyno, C.Poilane, K.Kitamura, S.Miyazaki, P.Debobelle, C.Lexcellent. *Mater. Sci. Eng. A*, **273–275**, 727 (1999)
7. J.E.Elder, R.Thamburaj, P.C.Patniak. *Surf. Eng.*, **5**, 55 (1989)
8. T.Wierzchoń, E.Czarnowska, D.Krupa. *Inżynieria Powierzchni w Wytwarzaniu Biomateriałów Tytanowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004
9. V.C.Nath, D.K.Sood, R.R.Manory. *Surf. Coat. Technol.*, **49**, 510 (1991)
10. И.И.Корнилов, О.К.Белоусов, Е.В.Качур. *Никелид титана и другие сплавы с эффектом «памяти»*. Наука, Москва, 1977
11. В.А.Лихачев, С.Л.Кузьмин, З.П.Каменцева. *Эффект памяти формы*. ЛГУ, Ленинград, 1987
12. К.Ооцука, К.Симидзу, Ю.Судзуки. *Сплавы с эффектом памяти формы*. Металлургия, Москва, 1990
13. *Shape Memory Materials*. (Eds K.Otsuka, C.M.Wayman). Cambridge University Press, Cambridge, 1999
14. В.Н.Хачин, В.Г.Пушин, В.В.Кондратьев. *Никелид титана: структура и свойства*. Наука, Москва, 1992
15. В.Г.Пушин, С.Д.Прокошкин, Р.З.Валиев. *Сплавы никелида титана с памятью формы. Ч. 1. Структура, фазовые превращения и свойства*. (Под ред. В.Г.Пушина). УрО РАН, Екатеринбург, 2006
16. *Материалы с эффектом памяти формы: справочное издание в четырех томах*. (Под ред. В.А.Лихачева). НИИХ СПбГУ, С.-Петербург, 1997
17. *Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Т. 1. Медицинские материалы с памятью формы*. (Под ред. В.Э.Гюнтера). МИЦ, Томск, 2011
18. С.В.Mello, M.Ueda, С.М.Lepienski, H.Reuther. *Appl. Surf. Sci.*, **256**, 1461 (2009)
19. С.В.Mello, M.Ueda, M.М.Silva, H.Reuther, L.Pichon, С.М.Lepienski. *Wear*, **267**, 867 (2009)
20. N.Padhy, S.Ningshen, В.К.Panigrahi, U.Kamachi Mudali. *Corros. Sci.*, **52** (1), 104 (2010)
21. S.Aoki, Y.Teranishi, A.Mitsuo, M.Kawaguchi, K.Morikawa, A.Suzuki, M.Masuko. *J. Eng. Tribol.*, **224**, 957 (2010)
22. K.Feng, X.Cai, Z.Li, P.K.Chu. *Mater. Lett.*, **68**, 450 (2012)
23. N.Kumar, S.Kataria, S.Dash, S.K.Srivastava, C.R.Das, P.Chandramohan, A.K.Tyagi, K.G.M. Nair, B.Raj. *Wear*, **274–275**, 60 (2012)
24. P.Saravanan, V.S.Raja, S.Mukherjee. *Surf. Coat. Technol.*, **201**, 8131 (2007)
25. *Fundamentals Thermomechanics Shape Memory Materials*. (Ed. W.Nowacki). IPPT PAN; Centre for Mechanics; Modern Trends in Mechanics of Materials, Warszawa, 1996
26. D.Stroz. *Oddziaływanie Zniekształceń Sieciowych na Przebieg Przemiany Martenzytycznej w Stopach NiTi*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice, 2005
27. L.G.Machado, M.A.Savi. *Braz. J. Med. Biol. Res.*, **36**, 683 (2003)
28. R.Pelton, D.Stockel, T.W.Duerig. *Mater. Sci. Forum*, **63**, 327 (2000)
29. B.Raniecki, Ch.Lexcellent, K.Tanaka. *Arch. Mech.*, **44**, 261 (1992)
30. Е.А.Базыль, А.Д.Погребняк, С.В.Соколов, Н.В.Свириденко. *Физика и химия обработки материалов*, **1**, 17 (2000)
31. А.Д.Погребняк, А.Р.Кобзев, В.Р.Грищенко, S.Sokolov, E.Bazyl, N.V.Sviridenko, A.N.Valyaev, Yu.F.Ivanov. *J. Appl. Phys.*, **87**, 2142 (2000)
32. А.Д.Погребняк, А.Р.Кобзев, В.Р.Грищенко, S.Sokolov, E.Bazyl, N.V.Sviridenko, A.N.Valyaev, S.V.Plotnikov. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, L248 (1999)
33. L.L.Meisner, A.I.Lotkov, M.G.Demytyeva, N.N.Koval, Yu.F.Ivanov, E.Yu.Gudimova. *Rare Met.*, **28**, 361 (2009)
34. N.Levintant-Zayonts, S.Kucharski. *Mater. Eng.*, **34**, 855 (2011)
35. H.Gleiter. *Acta Mater.*, **48**, 1 (2000)

102. А.Д.Погребняк, Л.В.Маликов, С.Н.Братушка, Н.К.Ердыбаева, Н.Левинтант, С.В.Плотников. *Журн. техн. физики*, **54**, 667 (2009)
103. T.Lagrange, C.Abromeit, R.Gotthardt. *Mater. Sci. Eng., A*, **438–440**, 521 (2006)
104. A.N.Valyaev, M.K.Kylyshkanov, A.D.Pogrebnyak, A.A.Valyaev, S.V.Plotnikov. *Vacuum*, **58**, 53 (2000)
105. A.D.Pogrebnyak, V.S.Ladysev, N.A.Pogrebnyak, A.D.Michaliyov, V.T.Shablya, A.N.Valyaev, A.A.Valyaev, V.B.Loboda. *Vacuum*, **58**, 45 (2000)
106. A.D.Pogrebnyak, N.I.Shumakova. *Surf. Coat. Technol.*, **122**, 183 (1999)
107. В.И.Бойко, А.Н.Валев, А.Д.Погребняк. *Успехи физ. наук*, **42**, 1139 (1999)
108. Е.А.Базыл', А.Д.Погребняк, В.Р.Грисянко, С.В.Сokolov, V.V.Stayko, N.V.Sviridenko, S.N.Bratushka. *Tech. Phys. Lett.*, **25**, 621 (1999)
109. Yu.N.Tyurin, A.D.Pogrebnyak. *Surf. Coat. Technol.*, **111**, 269 (1999)
110. Yu.F.Ivanov, A.D.Pogrebnyak. *Met. Phys. Adv. Technol.*, **20**, 30 (1998)
111. A.D.Pogrebnyak, V.T.Shablia, N.A.Pogrebnyak, R.Sandrik, A.Zecca, S.N.Bratushka. *Surf. Coat. Technol.*, **110**, 35 (1998)
112. A.D.Pogrebnyak, R.Sandrik, A.D.Mikhailov, N.A.Pogrebnyak Jr., Yu.V.Tsvintarnaya, V.I.Lavrentiev, M.Iljashenko, A.Zecca. *Phys. Lett. A*, **241**, 357 (1998)
113. V.I.Lavrent'ev, A.D.Pogrebnyak, A.D.Mikhalev, N.A.Pogrebnyak, R.Sandrik, A.Zecca, Yu.V.Tsvintarnaya. *Tech. Phys. Lett.*, **24**, 334 (1998)
114. J.Dutkiewicz, W.Maziarz, T.Czeppe, L.Litynska, W.Nowacki, P.Gadaj, J.Lukner, E.Pieczyska. *Eur. Phys. J.*, **158**, 59 (2008)
115. С.НеБинг, J.Frenzel, M.Pohl, S.Shabalovskaya. *Mater. Sci. Eng. A*, **486**, 461 (2008)
116. А.В.Белый, В.А.Кукаренко, В.И.Копылов, Ю.П.Шаркеев. *Трение и износ*, **29**, 571 (2008)
117. Л.Мейснер, А.Лотков, В.Сивоха, А.Турова, Е.Г.Бармина. *Физика и химия обработки материалов*, (1), 78 (2003)
118. J.Narajczyk, Z.Werner, M.Barlak, D.Morozow. *Vacuum*, **83**, S228 (2009)
119. X.Liu, Sh.Wu. *Mater. Sci. Eng. A*, **444**, 192 (2007)
120. X.Ju, H.Dong. *Surf. Coat. Technol.*, **201**, 1542 (2006)
121. H.F.Zhang, Y.Cheng, Y.F.Zheng. *Surf. Coat. Technol.*, **201**, 6857 (2007)
122. P.Zukowski, F.F.Komarov, Cz.Karwat, K.Kiszczak, Cz.Kozak, A.S.Kamyshan. *Vacuum*, **83**, S204 (2009)
123. J.Li, M.Sun, X.Ma, G.Tang. *Wear*, **261**, 1247 (2006)
124. M.Ueda, M.M.Silve, C.Otani, H.Reuther, M.Yatsuzuka, C.M.Lepienski, L.A.Berni. *Surf. Coat. Tech.*, **169–170**, 408 (2003)
125. N.Levintant. *Vacuum*, **81**, 1183 (2007)
126. T.Czeppe, N.Levintant-Zayonts, Z.Swiatiek, M.Michalec. *Vacuum*, **83**, S214 (2009)
127. M.Mayer. *Nucl. Instrum. Methods, B*, **266**, 1852, (2008)
128. N.Levintant-Zayonts, S.Kucharski. *Vacuum*, **83**, S220 (2009)
129. W.Yan, Q.Sun, Xi-Qiao Feng, L.Qian. *Int. J. Solid. Struct.*, **44**, 1 (2007)
130. S.Kucharski. D.Sc.Thesis. Thesis. Institute of Fundamental Technological Research RAS, Warszawa, 2002
131. S.Kucharski, Z.Mroz. *Mater. Sci. Eng. A*, **379**, 448 (2004.)
132. N.Levintant-Zayonts, S.Kucharski. *Mater. Eng.*, **1**, 45 (2009)
133. A.Ziołkowski. D.Sc. Thesis. Institute of Fundamental Technological Research PAS, Warszawa, 2006
134. F.T.Cheng. *Mater. Sci. Technol.*, **20** (6), 700 (2004)
135. E.Pieczyska. D.Sc.Thesis. Thesis. Institute of Fundamental Technological Research PAS, Warszawa, 2008
136. K.Tanaka, K.Kitamura, S.Miyazaki. *Arch. Mech.*, **51**, 785 (1999)
137. A.Ziołkowski. Ph.D. Thesis. Institute of Fundamental Technological Research PAS, Warszawa, 1995
138. H.Pokhmurska, O.Kalakhn, H.Okhota, N.Levintant-Zayonts. In *Proceedings of the European Corrosion Congress (EUROCORR 2008)*. Edinburg, UK, 2008. P. 7
139. F.Auricchio, R.Taylor. *Comput. Methods Appl. Mech.*, **143**, 175 (1997)
140. V.A.L'vov, A.A.Rudenko, V.A.Chernenko, E.Cesari, J.Pons, T.Kanomata. *Mater. Trans.*, **46**, 790 (2005)
141. K.Otsuka, X.Ren. *Prog. Mater. Sci.*, **50**, 511 (2005)
142. P.Sitner, Y.Liu, V.Novak. *J. Mech. Phys. Solids*, **53**, 1719 (2005)
143. D.S.Plant, D.M.Grant, L.Lea. *Biomaterials*, **26**, 5359 (2005)
144. J.Poate, G.Foti, D.Jacobson. *Surface Modification and Alloying*. Plenum Press, New York, 1983
145. D.J.Weaver, A.G.Veldhuizen, M.M.Sanders, J.M.Schakenrad, J.R.van Horn. *Biomaterials*, **18**, 1115 (1997)
146. Л.Л.Мейснер, В.П.Сивоха, Н.А.Литовченко, А.А.Нейман, С.Н.Мейснер, Ч.Дянь. *Журн. физ. химии*, **1** (2), 58 (2007)
147. T.Asaoka, A.Mitsuo. *Mater. Trans. JIM*, **41** (6), 739 (2000)
148. H.Pelletier, D.Muller, P.Mille, J.Grob. *Surf. Coat. Technol.*, **158–159**, 309 (2002)
149. D.Grant, S.Green, J.Wood. *Mater. Sci. Eng., A*, **224**, 21 (1997)
150. Z.Swiatiek, M.Michales, N.Levintant-Zayonts, J.Bonarski, A.Budziak, O.Bonchuk, G.Savitski. *Acta Phys. Pol., A*, **120** (1), 75 (2011)
151. L.Mejsner, V.Sivokha, A.Lotkov, E.Barmina. *J. Phys. IV (France)*, **112**, 663 (2003)
152. S.Green, D.Grant, J.Wood, A.Johanson, L.Sarholt-Kristensen. *J. Mater. Sci. Lett.*, **12**, 618 (1993)
153. M.Mayer. *SIMNRA User's Guide. Tech. Rep. IPP 9/113*. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, 1997
154. А.Д.Погребняк, N.Levintant, Л.В.Маликов, В.М.Береснев, С.Н.Братушка, Н.К.Ердыбаева, Т.Сzeppe, Zb.Zwiatiek, M.Micleales. *Вопросы атомной науки и техники*, (6), 162 (2009)
155. В.Раниеcki, К.Танака. *Int. J. Eng. Sci.*, **32**, 1845 (1994)
156. Л.Мейснер, В.Сивоха, Ю.Шаркеев, С.Кульков, В.Гриценко. *Журн. техн. физики*, **70**, 32 (2000)
157. А.Д.Погребняк, Н.К.Ердыбаева, Л.В.Маликов, С.Н.Братушка, Н.Левинтант. *Вопросы атомной науки и техники*, (1), 81 (2008)
158. А.Погребняк, S.Bratushka, N.Levintant-Zayonts. *J. Nano-Electron. Phys.*, **5**, 01016 (2013)
159. Г.А.Малыгин. *Успехи физ. наук*, **181**, 1129 (2011)
160. Г.А.Малыгин. *Физика тв. тела*, **50**, 1480 (2008)
161. Р.А. Андриевский, А.М. Глезер. *Успехи физ. наук*, **179**, 337 (2009)
162. K.M.Zhang, J.X.Zou, T.Grosdidier. *J. Nanomater.*, ID 978568 (2013)

Свидетельство о регистрации № 0110235 от 08.02.93 в Министерстве печати и информации Российской Федерации.  
Учредители: Российская академия наук, Институт органической химии им. Н.Д.Зелинского РАН

Номер набран и сверстан с использованием системы **Advent 3B2 Total Publishing System** на оборудовании, поставленном фирмой «Turpion Ltd».

Подписано к печати с оригинал-макета 11.11.2013. Дата выхода в свет 30.11.2013. Формат 60 × 90 1/8. Печать цифровая. Печатные листы 11. Тираж 300 экз. Заказ 4337.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных диапозитивов в ППП «Типография «Наука» 121099 Москва, Шубинский пер., 6.