

3-бөлім
**КОНДЕНСИРЛЕНГЕН КҮЙ ФИЗИКАСЫ
ЖӘНЕ МАТЕРИАЛТАНУ ПРОБЛЕМАЛАРЫ.
НАНОҒЫЛЫМ**

Section 3
**CONDENSED MATTER PHYSICS AND
MATERIALS SCIENCE PROBLEMS.
NANOSCIENCE**

Раздел 3
**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
И ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ.
НАНОНАУКА**

**Габдрахманова Л.А.¹, Мукашев К.М.^{2*}, Мурадов А.Д.²,
Умаров Ф.Ф.³, Яр-Мухамедова Г.Ш.²**

¹Башкортанский государственный университет, Россия, г. Уфа

²НИИЭТФ КазНУ им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

³Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы,

*e-mail: mukashev.kms@gmail.com

МИКРОСТРУКТУРА И ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛОВ КОБАЛЬТА, ПОЛУЧЕННОГО ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

Наноструктурные образцы кобальта были получены методом интенсивной пластической деформацией кручением. Высокое квазигидростатическое давление в рабочей области до 8 ГПа создавалась на установке типа наковальни Бриджмена. Накováльни изготовлены из карбида вольфрама. Метод позволяет получать образцы высокой чистоты без пор и загрязнений. Для проведения рентгенографических исследований использовали дифрактометр ДРОН-7 с кобальтовым излучением. Анализ рентгенограмм проводили по методу Брэгга-Брентано. Для проведения фазового анализа использовали K_{α} -линии. Размеры нанокристаллического кобальта достигали порядка 25÷50 нм. Установлено, что при низкотемпературном отжиге в структуре кобальта происходит возврат. Отжиг выше 300°C приводит к рекристаллизации его структуры. Полученный интенсивной пластической деформацией кручением нанокристаллический кобальт после нагрева выше температуры фазового перехода и охлаждения ниже этой температуры сохраняет высокотемпературную ГЦК структуру. Показано, что природа задержки ГЦК-ГПУ перехода может быть связана с изменениями размеров и напряженным состоянием кристаллитов, образующих нанокристаллический кобальт.

Ключевые слова: кобальт, интенсивная пластическая деформация, наноструктура, метод Брэгга-Брентано, отжиг, возврат, рекристаллизация, структурные превращения.

Gabdrakhmanova L.A.¹, Mukashev K.M.², Muradov A.D.²,
Umarov F.F.³, Yar-Mukhamedova G.Sh.²

¹Bashkortstan State University, Russia, Ufa

²ETP Al-Farabi Kazakh National university, Kazakhstan, Almaty

³Kazakh-British Technical University, Kazakhstan, Almaty,

e-mail: mukashev.kms@gmail.com

Microstructure and phase relationships of cobalts nanocrystals obtained by severe plastic deformation

Nanostructured cobalt samples were obtained by method of severe plastic deformation by torsion. The high quasi-hydrostatic pressure in the working region (up to 8 GPa) was created at installation of Bridgman anvil type. The anvils were made of tungsten carbide. The method allows to obtain the samples of high purity without pores and impurities. To carry out of X-ray studies, a DRON-7 diffractometer with cobalt radiation was used. X-ray analysis was performed according to the Bragg-Brentano method. For phase analysis the K_{α} lines were used. The sizes of nanocrystalline cobalt reached about 25 ÷ 50 nm. It is established that during low-temperature annealing a reset occurs in the structure of cobalt. Annealing above 300°C leads to recrystallization of its structure. Derived by severe plastic deformation by torsion nanocrystalline cobalt after heating above the phase transition temperature and cooling below this temperature retains the high-temperature fcc structure. It is shown that the nature of the hcp-fcc delayed

transition can be connected with a sizes changes and a strained state of crystallites forming nanocrystalline cobalt.

Key words: cobalt, severe plastic deformation, nanostructure, the Bragg-Brentano method, annealing, reset, recrystallization, structural transformations.

Габдрахманова Л.А.¹, Мұқашев Қ.М.², Мұрадов А.Д.³,
Умаров Ф.Ф.³, Яр-Мухамедова Г.Ш.²

¹Башқортстан мемлекеттік университеті, Россия, Уфа қ.

²Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

³Қазақстан-Британ техникалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.,
e-mail: mukashev.kms@gmail.com

Қарқынды пластикалық деформация арқылы өндірілген нанокристалды кобальттың микроқұрылымы және фазалық қатынастары

Наноқұрылымды кобальт үлгілері бұрау арқылы жүргізілген қарқынды пластикалық деформацияны пайдалану нәтижесінде өндірілді. Үлгінің жұмысшы аумағындағы жоғары 8 ГПа шамасындағы квазигидростатикалық қысымға Бриджмен төсі тектес құрылғыны пайдалану нәтижесінде қол жетті. Төстің негізгі жұмысшы элементі вольфрам карбидінен жасалды. Бұл әдіс тазалығы айрықша жоғары және ешбір кеуексіз үлгілерді алуға негіз болды. Рентгенографиялық зерттеулер кобальттан жасалған сәуле шығаратын элементі бар Дрон-7 дифрактометрмен жүргізілді. Рентгенограммаларды талдау Брэгг-Брентано әдісі арқылы орындалды. Фазалық талдау K_{α} – шоғырына сүйену нәтижесінде іске асырылды. Наонокристалдық кобальттың өлшемдері 25-50 нм шамада болды. Төменгі температуралық жасыту нәтижесінде кобальттың құрылымы кері қайту арқылы қалыптасатыны, ал жоғары температуралық жасыту барысында рекристаллизациялық түрленулер орын алатыны белгілі болды. Жоғары температуралық фазалық үрлену температурасында қыздырылып, одан төменгі температурада суытылған нанокристалдық кобальттың жоғары температуралық БЦК – тық құрылымды сақтайтыны анықталды. Бұл кешігудің табиғаты нанокристалдық кобальтты түзуші кристаллиттердің өлшемдерінің өзгерісімен және жаңа кернеулік күйлерінің түзілуімен түсіндіріледі.

Түйін сөздер: кобальт, қарқынды пластикалық деформация, наноқұрылым, Брэгг-Брентано әдісі, жасыту, қайтару, рекристаллизация, құрылымдық түрлену.

Введение

Нанокристаллические (НК) материалы представляют большой научный и практический интерес из-за их необычных физических свойств [1-3]. С переходом в НК состояние коэффициент диффузии возрастает на несколько порядков [4], увеличиваются прочность и пластичность [5], повышается химическая активность, наблюдается аномальное смещение температуры Кюри, намагнитченности насыщения, упругих свойств [6-8], меняются электрическое сопротивление и другие характеристики материалов [9-11]. В то же время НК материалы не являются термически стабильными. При нагреве в таких материалах развиваются релаксационные процессы, приводящие к постепенному переходу в крупнокристаллическое состояние и потере физических свойств, обусловленных НК структурой [12-15]. Результаты исследований последних лет позволяют предположить, что особые свойства НК материалов обусловлены не только большой протяженностью внутренних границ раздела, но и особым неравновесным состоянием границ

зерен. Поэтому понимание особенностей поведения НК материалов тесно связано с пониманием физической природы неравновесности внутренних границ раздела [16-18].

В настоящее время считается, что физические свойства НК материалов обусловлены большим вкладом границ зерен и упругими напряжениями в кристаллической решетке [19, 20]. Для каждого материала существует характерный критический размер структурной единицы, ниже которого физические свойства материала меняются коренным образом. При размерах кристаллитов меньших критического, дислокации и вакансии выталкиваются из объема кристалла в зернограничную область. С уменьшением размеров кристаллитов в ряде материалов наблюдается изменение типа кристаллической решетки. Параметры решетки с уменьшением размеров кристаллитов для разных материалов часто меняются неоднозначно. Изменение химических и физических свойств с переходом в НК состояние в основном поддается объяснению [21-24]. Однако, природа многих явлений, происходящих в НК материалах, еще

изучена недостаточно. Поэтому изучение природы процессов в НК материалах представляет большой научный и практический интерес.

Интерес к проблеме стабильности НК материалов, полученных интенсивной пластической деформацией (ИПД), связан с практическим их применением. Как правило, исследования в этой области направлены на стабилизацию структуры НК материалов до более высоких температур. Например, известно, что НК структуру можно стабилизировать добавлением небольшого количества соответствующей фазы. Так известно, что термическую стабильность НК меди можно улучшить посредством добавления определенной концентрации оксида алюминия Al_2O_3 [25].

В данной работе обсуждаются результаты исследования фазовых и структурных превращений в НК кобальте, полученном посредством интенсивной пластической деформации (ИПД). Выбор кобальта в качестве объекта исследования обусловлен следующими причинами:

– Кобальт может быть получен в НК состоянии методом ИПД.

– Кобальт имеет сравнительно низкую температуру полиморфного превращения ($\sim 427^\circ C$) из гексагональной плотноупакованной (ГПУ) структуры в кубическую гранцентрированную структуру (ГЦК), поэтому является удобным модельным объектом для изучения влияния размеров кристаллитов и их напряженного состояния на характер такого рода переходов.

– Нанокристаллический кобальт имеет сложный фазовый состав, проявляет аномальные магнитные свойства и ему свойственно термическое расширение. Все это в совокупности определяет актуальность исследований, предпринятых в данной работе.

Крупнокристаллический кобальт при комнатной температуре имеет ГПУ структуру. При температурах порядка $417-427^\circ C$ кобальт из ГПУ структуры переходит в ГЦК структуру. Данный переход является бездиффузионным обратимым фазовым переходом мартенситного типа. В зависимости от содержания примесей, концентрации дефектов, скорости нагрева и охлаждения, степени деформации и других факторов данный переход характеризуется гистерезисом, ширина которого достигает примерно $40^\circ C$. Установлено, что одним из основных факторов, влияющих на стабильность фаз и фазовый переход, является размер зерна. При малых размерах зерен стабильна ГЦК фаза ко-

бальта, в то же время при комнатных температурах в крупнозернистых материалах в основном образуется ГПУ структура. В образцах с неоднородным распределением зерен по размерам образуется смесь ГЦК и ГПУ фаз. Однако, к настоящему времени влияние размеров зерен и связанных с этим микроискажений кристаллической решетки на стабильность фаз кобальта изучено недостаточно. Изучению структуры и физических свойств НК кобальта, полученного ИПД кручением, также посвящено небольшое число работ. При ИПД кобальта кручением образуется ГПУ структура с размерами зерен порядка 100 нм.

Методическое обеспечение исследований

Для получения наноструктурных образцов кобальта в данной работе использовали метод ИПД кручением под высоким квазигидростатическим давлением на установке типа наковальни Бриджмена. В отличие от методики компактирования порошков и метода шарового размола, данный метод наноструктурирования позволяет получать образцы, лишенные пор и загрязнений. Установка состоит из двух наковален, смонтированных на гидравлическом прессе. Пресс позволяет создавать давление в рабочей области до 8 ГПа. Накováльни изготовлены из карбида вольфрама. Нижняя наковальня является подвижной и может вращаться вокруг вертикальной оси относительно верхней.

Рентгеновские исследования проводили на дифрактометре ДРОН-7 на Co -излучении по методу Брэгга-Брентано. Для подавления $K\beta$ -линии использовали Fe -фильтр. В качестве детектора использовался сцинтилляционный счетчик. Съемку дифрактограмм проводили при анодном напряжении $U=40$ кВ и анодном токе $I=20$ мА. Для проведения фазового анализа использовали $K\alpha$ -линии. Съемку проводили по шаговому методу посредством набора числа импульсов за время экспозиции $t=5$ сек. При проведении фазового анализа шаг сканирования составлял 0.04 градуса, а при анализе профиля дифракционных линий и определении их ширины – 0.01 градуса. Абсолютная погрешность измерения угловых положений дифракционных максимумов не превышала $\pm 0.02^\circ$. Основная аппаратная погрешность измерения скорости счета импульсов не превышает 0.35% . Для фазового анализа использовали следующие

щели на первичном пучке: горизонтальная щель – 8 мм, вертикальная щель – 2 мм; на дифрагированном пучке: горизонтальная щель – 8 мм, вертикальная щель – 0.1 мм. Щели Соллера на первичном и дифрагированном пучке имела расходимость – 1.5° .

В данной работе дифрактограммы снимали с плоской поверхности образца при комнатной температуре. Образцы, полученные после пластической деформации кручением под давлением, имели форму дисков. Межплоскостные расстояния определяли путем измерения соответствующих дифракционных углов по формуле Вульфа-Брэггов:

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda,$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения; θ – угол отражения; d_{hkl} – межплоскостное расстояние; n – порядок отражения. Параметры решетки a и c определяли с использованием формулы при известных индексах плоскостей (hkl) методом наименьших квадратов с использованием компьютерной программы:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3a^2} (h^2 + hk + k^2) + \frac{l^2}{c^2}.$$

Влияние температуры отжига на микроструктуру кобальта

Для решения поставленных задач нами были проведены электронно-микроскопические исследования. На рисунке 1а приведена микроструктура пластически деформированного образца до отжига. Видно, что микроструктура образца после пластической деформации достаточно однородная, границы между кристаллитами нечеткие, размытые. Средний размер кристаллитов определяется с трудом и составляет около 25÷50 нм. Электронограмма образца состоит из множества близко расположенных по окружности рефлексов, что свидетельствует о малом размере кристаллитов и об их однородности по размерам. Заметная вытянутость рефлексов в азимутальном направлении указывает на высокий уровень внутренних напряжений. После отжига при 300°C размеры кристаллитов практически не изменились, но границы между ними стали более четкими (рис.1б). Это свидетельствует о том, что в образце частично произошел возврат. Электронограмма образца

после отжига при 300°C заметно изменилась: интенсивность отдельных рефлексов выросла и число рефлексов на кольцах заметно уменьшилось.

Это свидетельствует об увеличении размеров кристаллитов и уменьшении их числа в облучаемом объеме. Вытянутость рефлексов в азимутальном направлении указывает на сохранение внутренних напряжений в кристаллитах. Таким образом, после отжига при температурах порядка 300°C в образце происходит возврат и начинается рекристаллизация. После отжига при 400°C размеры кристаллитов заметно увеличиваются, границы между ними остаются размытыми (рис. 1в). С повышением температуры отжига интенсивность отдельных рефлексов продолжает расти, что свидетельствует о продолжении роста размеров кристаллитов. После отжига при 500°C в образце завершается процесс первичной рекристаллизации (рис.1г). Следовательно, по результатам электронно-микроскопических исследований структуры кобальта можно сделать следующие выводы:

– В НК кобальте, полученном ИПД кручением, размеры кристаллитов составляют примерно 25÷50 нм.

– При температурах отжига до ~300°C в НК кобальте наблюдается возврат, а выше 300°C – происходит рекристаллизация.

Определение фазового состава образцов

Тем не менее, по результатам электронно-микроскопических исследований трудно судить об изменении фазового состава образцов и размеров кристаллитов при отжиге. Поэтому представляет интерес определение фазового состава исследуемых образцов, размеров структурных фрагментов и их изменения в процессе отжига путем привлечения других, более информативных методов. Исходя из этого, дополнительно были проведены исследования влияния ИПД и отжига на фазовый состав НК кобальта путем измерения дифрактограмм. На рисунке 2 приведены дифрактограммы НК кобальта, полученного ИПД кручением, и образцов, отожженных при различных температурах. Дифрактограммы получены при комнатной температуре с плоской поверхности образца, образованной в результате ИПД кручением. Для исключения влияния закалки, при отжиге выше температуры ГЦК-ГПУ фазового перехода об-

разцы до 300°C охлаждались с печью со скоростью ~100 град/час, затем – на воздухе. Из рисунка видно, что пластически деформированный кобальт, как и недеформированный, при комнатной температуре имеет ГПУ структуру. Следовательно, пластическая деформация не приводит к изменению типа кристаллической решетки кобальта. Из рисунка 2 также видно, что пластически деформированные образцы,

отожженные при температурах до 450°C, также имеют ГПУ структуру. В зависимости от различных факторов кобальт претерпевает ГЦК-ГПУ фазовый переход при нагреве в интервале 422-440°C, при охлаждении – в интервале 387-405°C. Из этого следует, что пластическая деформация не приводит к заметному снижению температуры полиморфного ГЦК-ГПУ перехода кобальта.

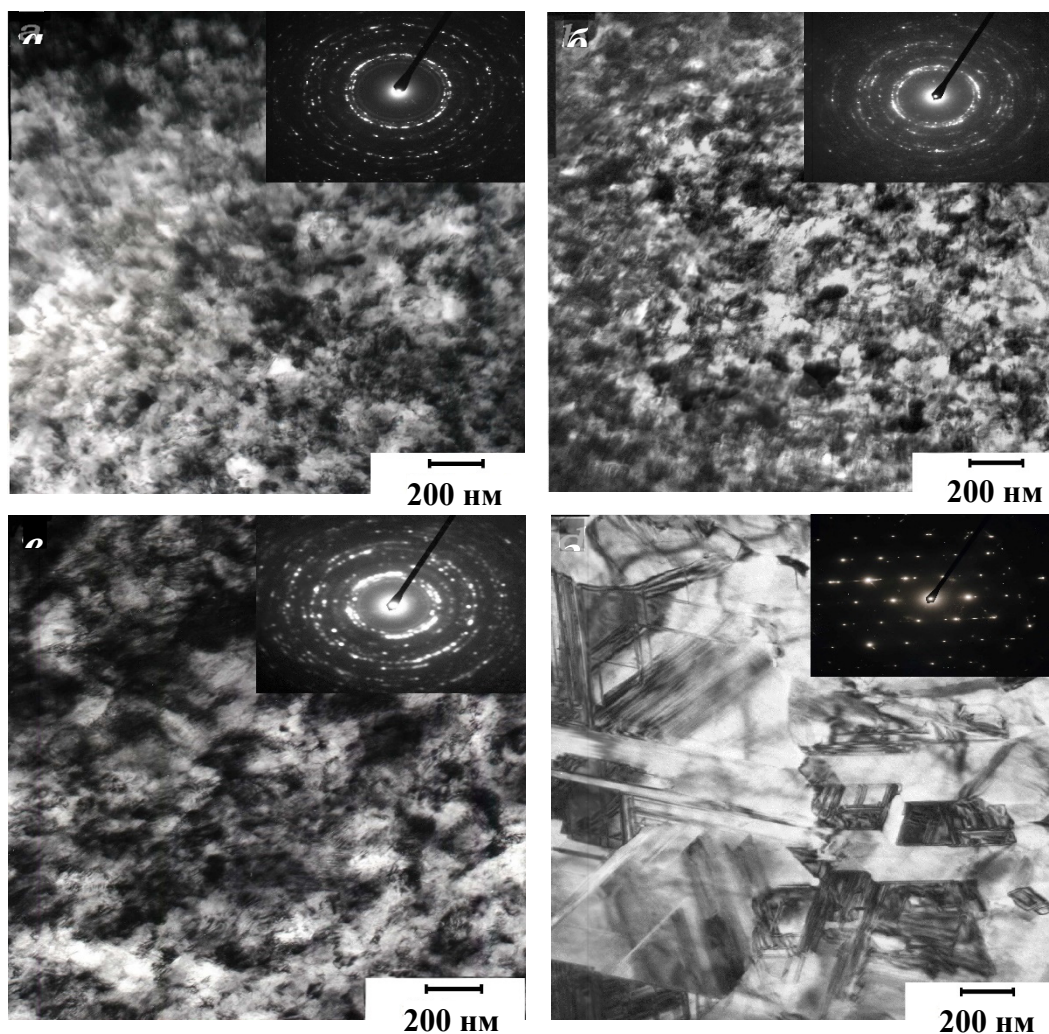


Рисунок 1 – Микроструктура кобальта после пластической деформации (а) и отжига при температурах 300°C (б), 400°C (в) и 500°C (г)

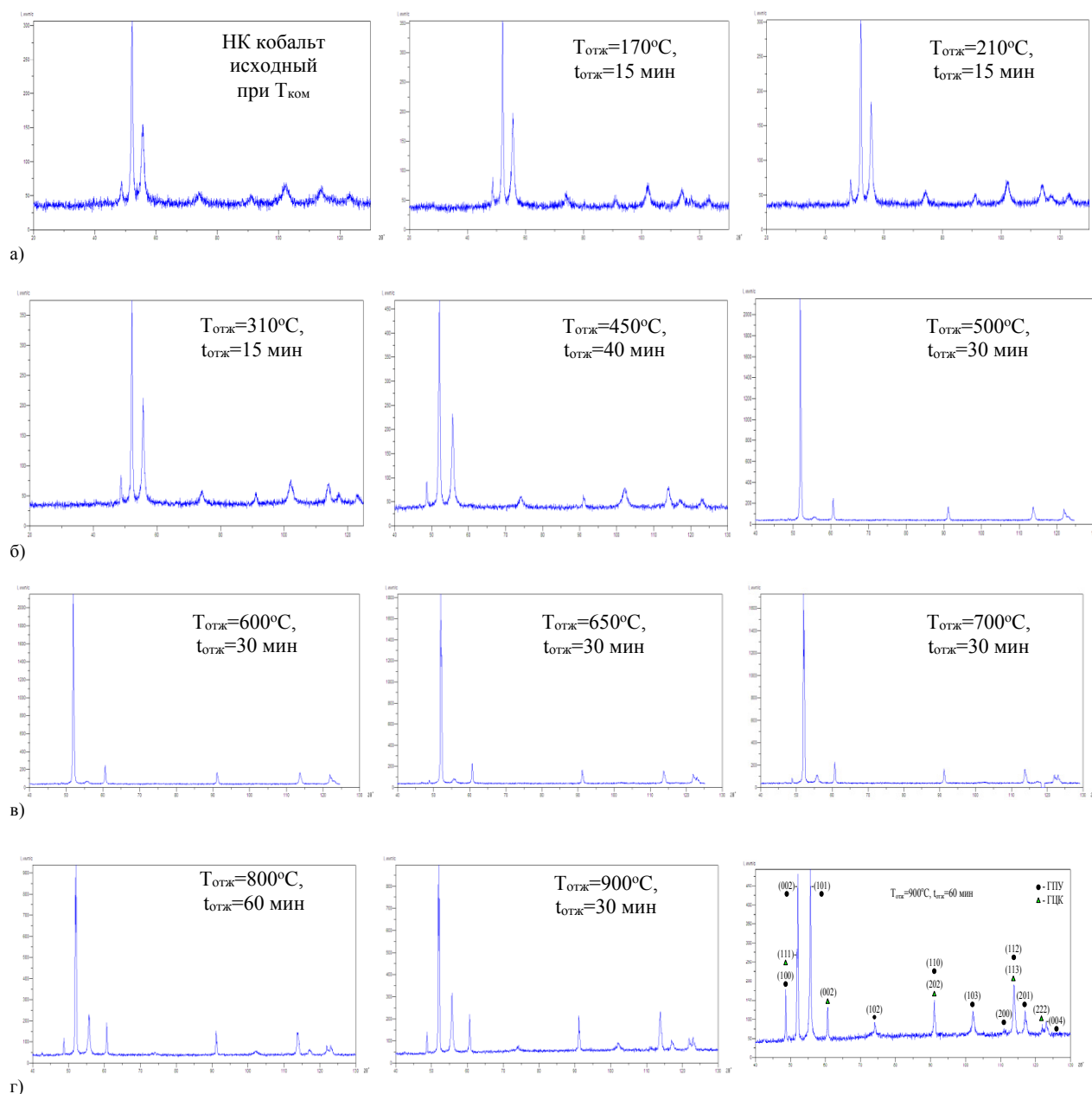


Рисунок 2 – Дифрактограммы НК кобальта, отожженного при различных температурах

Далее, образец после отжига при $500^{\circ}C$ и последующего охлаждения до комнатной температуры в основном состоит из ГЦК фазы. Таким образом, пластически деформированный кобальт после отжига выше температуры ГПУ-ГЦК превращения и последующего охлаждения ниже этой температуры сохраняет структуру высокотемпературной ГЦК фазы. Пластическая деформация препятствует переходу высокотемпературной ГЦК фазы кобальта в низкотемпературную ГПУ фазу при его охлаждении. Образцы, отожженные при температурах от $600^{\circ}C$ до

$900^{\circ}C$, при комнатной температуре состоят из смеси низкотемпературной ГПУ фазы и высокотемпературной ГЦК фазы.

Природа задержки ГЦК-ГПУ перехода может быть связана с изменениями размеров и напряженным состоянием кристаллитов. При пластической деформации размеры кристаллитов уменьшаются, в кристаллической решетке возникают сильные искажения. В объеме кристаллитов искажения решетки могут быть вызваны дислокациями и точечными дефектами. Кроме этого, при пластической деформации

образуется развитая зернограничная область с сильной дефектной структурой, которая еще может содержать аморфную фазу. Искажения решетки приводят к уменьшению плотности упаковки и к увеличению упругой энергии по сравнению с плотностью и энергией идеальной решетки. Относительный вклад искаженных областей в энергию кристалла растет с уменьшением размеров кристаллитов. Поэтому в кристаллитах кобальта, размеры которых меньше критического, выгоднее образование ГЦК структуры с более плотной упаковкой. Выше температуры ГПУ-ГЦК перехода НК кобальт имеет ГЦК структуру. При отжиге некоторые кристаллиты ГЦК фазы вырастают до критического размера и при охлаждении ниже температуры ГЦК-ГПУ перехода приобретают ГПУ фазу.

Т.о., по результатам рентгенофазового анализа можно сделать следующие заключения:

- пластически деформированный кобальт при комнатной температуре сохраняет ГПУ структуру;

- НК кобальт, полученный ИПД кручением, после нагрева выше температуры фазового перехода и охлаждения ниже этой температуры сохраняет высокотемпературную ГЦК структуру. НК структура кобальта, полученная ИПД, препятствует переходу высокотемпературной ГЦК фазы кобальта в низкотемпературную ГПУ фазу при его охлаждении.

Влияние температуры отжига на параметры решетки

Для подтверждения указанных предположений о стабильности ГПУ и ГЦК фаз НК кобальта были проведены исследования параметров решетки НК кобальта в зависимости от температуры отжига. Известно, что характеристики решетки являются структурно чувствительными параметрами. Поэтому изучение влияния размеров кристаллитов кобальта на периоды решетки имеет важное значение для понимания структурных изменений, происходящих в материале. При комнатной температуре НК кобальт согласно нашим данным имеет гексагональную структуру со следующими параметрами решетки: $a=2.509 \text{ \AA}$, $c=4.067 \text{ \AA}$. На рисунках 3 и 4 приведены зависимости параметров решетки и объема элементарной ячейки ГПУ НК кобальта от температуры отжига. В пределах погрешностей измерений параметр a до температуры отжига $T=200^\circ\text{C}$ не меняется. Среднее значение

параметра $a = 2.508 \text{ \AA}$ в этой области температур выше параметра a для крупнокристаллического недеформированного кобальта. При температурах отжига выше $T=200^\circ\text{C}$ параметр a уменьшается до $a = 2.506 \text{ \AA}$. Это значение параметра a практически совпадает с параметром решетки для крупнокристаллического недеформированного кобальта $a=2.505 \text{ \AA}$. При температурах отжига выше $T=250^\circ\text{C}$ параметр решетки a в пределах точности измерений не меняется.

При пластической деформации в кобальте образуется кристаллографическая текстура. Часто в металлах с ГПУ структурой при пластической деформации базисные плоскости ориентируются преимущественно перпендикулярно направлению приложенной нагрузки. При этом параметр c должен несколько уменьшаться по сравнению с параметром c недеформированного образца, а параметр a должен увеличиваться. При отжиге концентрация дефектов в кристаллитах уменьшается, и параметр решетки a принимает значение, близкое к параметру бездефектного кристалла.

После отжига при $T=100^\circ\text{C}$ параметр решетки c возрастает до $c = 4.071 \text{ \AA}$. Это значение параметра c ниже, чем параметр c для крупнокристаллического недеформированного кобальта $c = 4.089 \text{ \AA}$. После отжига при температуре $T = 200^\circ\text{C}$ наблюдается заметное уменьшение параметра c . Уменьшение c коррелирует с уменьшением параметра a и объема элементарной ячейки V (рис.4). Эти результаты подтверждают наши предположения о том, что при температуре $T \sim 200^\circ\text{C}$ начинаются активные процессы релаксации, которые приводят к снижению концентрации дефектов решетки. Скачок на зависимостях $c(T)$ и $V(T)$ при $T \sim 350^\circ\text{C}$ связан с началом процесса рекристаллизации. Ибо относительное изменение объема после возврата составляет

$$\Delta V/V = 0.20\%, \text{ а параметров решетки } \Delta a/a = 0.12\% \text{ и } \Delta c/c = 0.04\%$$

Для подтверждения наших предположений о стабильности ГПУ и ГЦК фаз НК кобальта нами была изучена зависимость отношения параметров c/a от температуры отжига (рис. 5). Для не отожженного НК кобальта отношение $c/a=1.621$, что заметно меньше значения этого параметра для крупнокристаллического недеформированного кобальта $(c/a)_{\text{КК}}=1.632$ и теоретического значения этого параметра

$(c/a)_T=1.633$, соответствующего наиболее стабильному состоянию ГПУ структуры. Следовательно, ГПУ фаза НК кобальта, полученного ИПД кручением, менее стабильна, чем ГПУ фаза крупнокристаллического недеформированного

кобальта. С повышением температуры отжига для НК кобальта отношение параметров (c/a) растет до значения $(c/a)=1.6233$. Следовательно, ГПУ фаза НК кобальта с повышением температуры отжига становится более стабильной.

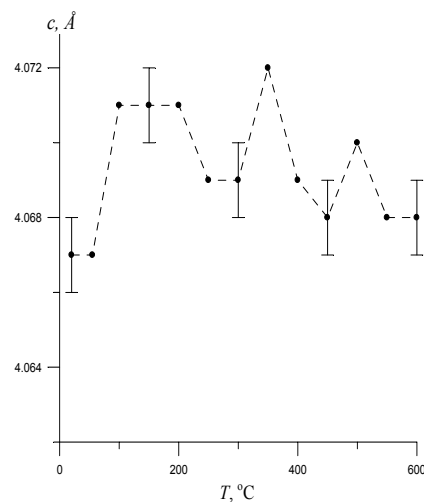
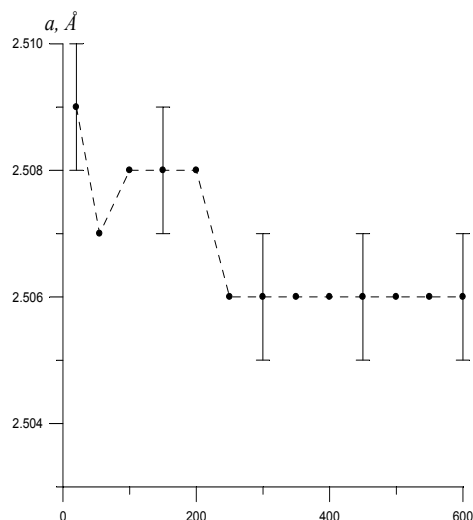


Рисунок 3 – Зависимость параметров решетки a и c НК кобальта от температуры отжига

Для идеальных ГПУ и ГЦК структур плотности упаковки одинаковы и энергии кристалла близки. В тоже время для НК кобальта, полученного ИПД кручением, плотность упаковки ниже, чем для идеальной ГПУ структуры. Поэтому в НК кобальте должна реализоваться наиболее плотноупакованная ГЦК структура с

меньшей энергией кристалла. При отжиге НК кобальта плотность дефектов в материале снижается, а плотность упаковки стремится к плотности идеальной ГПУ структуры. Это приводит к снижению упругой энергии ГПУ решетки, благодаря чему переход ГЦК структуры в ГПУ структуру становится более вероятным.

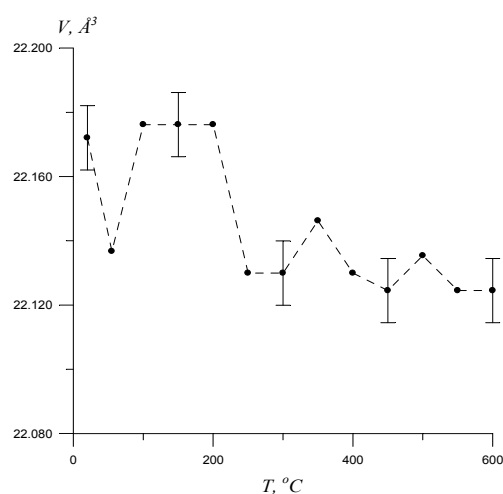


Рисунок 4 – Зависимость объема элементарной ячейки НК кобальта от температуры отжига

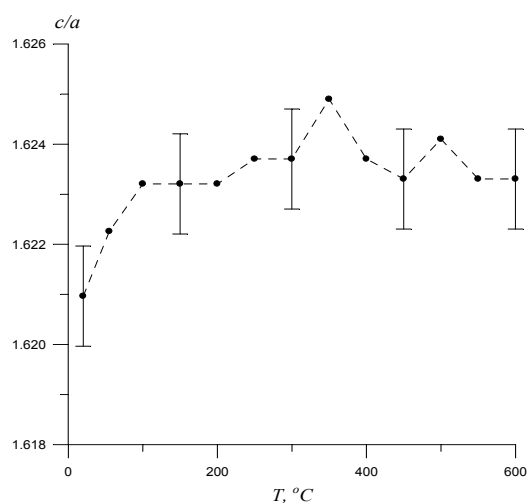


Рисунок 5 – Зависимость отношения c/a НК кобальта от температуры отжига

Заключение

По данным электронно-микроскопических исследований в НК кобальте, полученном ИПД кручением, размеры кристаллитов не превышают 25÷50 нм. Если низкотемпературный отжиг НК кобальта до ~300°C сопровождается возвратом, то отжиг выше 300°C приводит к рекристаллизации его структуры. НК кобальт, полученный ИПД кручением, после нагрева выше температуры фазового перехода и охлаждения ниже этой температуры сохраняет высокотемпературную ГЦК структуру, чему препятствует НК структура кобальта, полученная ИПД. Механизм задержки ГЦК-ГПУ перехода может быть связан с изменениями размеров и напряженным состоянием кристаллитов. При пластической

деформации размеры кристаллитов уменьшаются, в результате в объеме кристаллической решетки возникают сильные искажения, которые могут быть вызваны возникающими в результате ИПД дислокациями и точечными дефектами [25]. Кроме того, при пластической деформации ГПУ кобальта из-за искажений кристаллической решетки плотность упаковки снижается по сравнению с плотностью упаковки идеальной ГПУ структуры, что приводит к повышению упругой энергии кристалла. Вследствие одинаковости плотности упаковок и близости энергий бездефектной решетки ГПУ и ГЦК кобальта, энергия решетки ГПУ кобальта, подвергнутого ИПД кручению, может оказаться выше энергии решетки ГЦК кобальта, что может быть причиной задержки ГЦК-ГПУ перехода.

Литература

- 1 Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
- 2 Gleiter H. Nanostructured materials: Basic concepts and microstructure // *Acta Mater.* – 2000. – V. 48. – P. 1-29.
- 3 Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: Изд-во центр «Академия», 2005. – 192 с.
- 4 Ribbe J., Baither D., Schmitz G., Divinski S.V. Network of porosity formed in ultrafine-grained copper produced by equal channel angular pressing // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – V. 102. – P. 165501-1-165501-4.
- 5 Коршак А.Ф., Чушкина Р.А., Шановалов Ю.А., Матейченко П.В. Фазовое состояние сверхпластичного сплава Bi-43%Sn и его изменения в условиях действия механических напряжений и старения // *ФММ.* – 2011. – Т. 112. – № 1. – С. 75-84.
- 6 Грабовецкая Г.П., Раточка И.В., Колобов Ю.Р., Пушкарева Л.Н. Сравнительные исследования зернограничной диффузии меди в субмикро- и крупнокристаллическом никеле // *ФММ.* – 1997. – Т. 83. – № 3. – С. 112-116.
- 7 Хомская И.В., Зельдович В.И., Хейфец А.Э., Фролова Н.Ю., Дякина В.П., Казанцев В.А. Эволюция структуры при нагреве субмикроструктурной и нанокристаллической меди, полученной высокоскоростным деформированием // *ФММ.* – 2011. – Т. 111. – № 4. – С. 383-390.
- 8 Korznikova G.F., Mulyukov Kh.Ya., Sharipov I.Z., Syutina L.A. Structure peculiarities and magnetic properties of submicrocrystalline terbium // *J. of Magnetism and Magnetic Materials.* – 1999. – V. 203. – P. 178-180.
- 9 Islamgaliev R.K., Pekala K., Pekala M., Valiev R.Z. The determination of the grain boundary width of ultrafine grained copper and nickel from electrical resistivity measurements // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 1997. – V. 162. – P. 559-566.
- 10 Vidya S., Solomon S., Thomas J.K. Synthesis, sintering and optical properties of CaMoO₄: a promising scheelite LTCC and photoluminescent material // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 2012. – V. 209. – № 6. – P. 1067-1074.
- 11 Baojie Y., Guozhen Y., Xixiang X., Jeffrey Y., Subhendu G. High efficiency amorphous and nanocrystalline silicon solar cells // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 2010. – V. 207. – № 3. – P. 671-677.
- 12 Frank A.C., Stowasser F., Miskys C.R., Ambacher O., Giersig M., Fischer R.A. Nanoscale hexagonal gallium nitride from single molecule precursors: microstructure and crystallite size dependent photoluminescence // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 1998. – V. 165. – P. 239-243.
- 13 Smardz K., Smardz L., Jurczyk M., Jankowska E. Electronic properties of nanocrystalline and polycrystalline TiFe_{0.25}Ni_{0.75} alloys // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 2003. – V. 196. – № 1. – P. 263-266.
- 14 Бродова И.Г., Шорохова Е.В., Ширинкина И.Г., Жиглев И.Н., Яблонских Т.И., Астафьев В.В., Антонова О.В. Эволюция структурообразования в процессе динамического прессования сплава АМЦ // *ФММ.* – 2008. – Т. 105. – № 6. – С. 630-637.
- 15 Anandakumar V.M., Khadar M.A. Synthesis, characterization and optical properties of nanocrystalline lead molybdate // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 2008. – V. 205. – № 11. – P. 2672-2672.
- 16 Bienkowski A., Kulik T., Szewczyk R., Ferenc J. Structure and magnetoelastic properties of partially nanocrystallized Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{16.5}B₆ alloy // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 2004. – V. 201. – № 15. – P. 3305-3308.
- 17 Кимов Г.Я., Прилипко С.Ю., Ревенко Ю.Ф., Тимченко В.М. Особенности физических свойств нанокристаллических образцов ((Ca_{0.65}St_{0.35})_{0.8}M_{1.2}O_{3±Δ}), полученных с использованием холодного изостатического прессования // *ФТТ.* – 2009. – Т. 51. – № 4. – С. 727-728.
- 18 Thirumal E., Prabhu D., Chattopadhyay K., Ravichandran V. Magnetic, electric and dielectric properties of FeCo alloy nanoparticles dispersed in amorphous matrix // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 2010. – V.207. – № 11. – P. 2505-2510.

19 Karimpoor Amir A. Mechanical properties of bulk nanocrystalline hexagonal cobalt electrodeposits: a thesis submitted in conformance with the requirements for the degree of master of applied science graduate department of materials science and engineering university of – Canada, 2001. – 112 p.

20 Мулюков Х.Я. Магнитные свойства магнитоупорядоченных металлов и сплавов с субмикроструктурной структурой: дис. д-ра техн. наук: 01.04.07. -Уфа, 1998. – 274 с.

21 Андриевский Р.А. Термическая стабильность наноматериалов // Успехи химии. – 2002. – Т. 71. – № 10. – С. 967-981.

22 Бокштейн Б.С., Брезе Г.Д., Куркин П.В., Трусов Л.И. Диффузия в нанокристаллическом Ni // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1994. – № 1. – С. 49-53.

23 Коршак В.Ф., Шановалов Ю.А., Матейченко П.В., Данилина И.А. Изменения структурно-фазового состояния и сверхпластических свойств эвтектики олово-свинец в процессе старения // Металлофизика. Новейшие технологии. – 2008. – Т. 30. – № 3. – С. 385-396.

24 Колобов Ю.Р., Валиев Р.З. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов. – Новосибирск: Наука, 2001. – 232 с.

25 Cizek J., Prochazka I., Kuzel R., Islamgaliev R. Influence of Al₂O₃ nanoparticles on the thermal stability of ultra fine grained copper prepared by high pressure torsion // Mondtsh. Chem. – 2002. –V. 133. – № 6. – P. 873-887.

References

- 1 R.Z. Valiev, Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoy plasticheskoy deformatsiey, (Moscow, Logos, 2000), 272 p. (in Russ).
- 2 H. Gleiter, Acta Mater., 48, 1-29 (2000).
- 3 R.A. Andrievskiy and A.V. Ragulya, Nanostrukturnye materialy, (Moscow, Akademia, 2005), 192 p. (in Russ).
- 4 J. Ribbe, D. Baither, G. Schmitz and S.V. Divinski, Phys. Rev. Lett. 102, 165501 (4p) (2009).
- 5 A.F. Korshak, R.A. Chushkina, Yu.A. Shapavalov and P.V. Mateychenko, FMM, 112 (1) 75-84 (2011). (in Russ).
- 6 G.P. Graboveckaya, I.V. Ratochka, Yu.R. Kolobov and L.N. Pushkareva, FMM, 83 (3), 112-116 (1997) (in Russ).
- 7 I.V. Khomskaya, V.I. Zeldovich, A.E. Kheyfec, N.Yu. Frolova, V.P. Dyakina and V.A. Kazancev, FMM, 111 (4), 383-390 (2011) (in Russ).
- 8 G.F. Korznikova, Kh.Ya. Mulyukov, I.Z. Sharipov and L.A. Syutina, J. of Magnetism and Magnetic Materials, 203, 178-180 (1999).
- 9 R.K. Islamgaliev, K. Pekala, M. Pekala and R.Z. Valiev, Phys. Stat. Sol. (a), 162, 559-566 (1997).
- 10 S. Vidya, S. Solomon and J.K. Thomas, Phys. Stat. Sol. (a), 209, 6, 1067-1074 (2012).
- 11 Y. Baojie, Y. Guozhen, X. Xixiang, Y. Jeffrey and G. Subhendu, Phys. Stat. Sol. (a), 207 (3), 671-677 (2010).
- 12 A.C. Frank, F. Stowasser, C.R. Miskys, O. Ambacher, M. Giersig and R.A. Fischer, Phys. Stat. Sol. (a), 165, 239-243 (1998).
- 13 K. Smardz, L. Smardz, M. Jurczyk and E. Jankowska, Phys. Stat. Sol. (a), 196 (1), 263-266 (2003).
- 14 I.G. Brodova, E.V. Shorokhova, I.G. Shirinkina, I.N. Jgilev, T.I. Yablonskikh, V.V. Astafiev and O.V. Antonova, FMM, 105 (6), 630-637 (2008). (in Russ).
- 15 V.M. Anandakumar and M.A. Khadar, Phys. Stat. Sol. (a), 205 (11), 2672-2672 (2008).
- 16 A. Bienkowski, T. Kulik, R. Szewczyk and J. Ferenc, Phys. Stat. Sol. (a), 201 (15), 3305-3308 (2004).
- 17 G.Ya. Akimov, S.Yu. Prilipko, Yu.F. Pevenko and V.M. Timchenko, FTT, 51 (4), 727-728 (2009) (in Russ).
- 18 E. Thirumal, D. Prabhu, K. Chattopadhyay and V. Ravichandran, Phys. Stat. Sol. (a), 207 (11), 2505-2510 (2010).
- 19 Karimpoor Amir A. Mechanical properties of bulk nanocrystalline hexagonal cobalt electrodeposits: a thesis submitted in conformance with the requirements for the degree of master of applied science graduate, (Canada, 2001), 112 p.
- 20 Kh.Ya. Mulyukov, Magnitnye svoystva magnitouporyadochennykh metallov i spлавov s submikroskopicheskoy strukturoy. Diss.d-ra tekhn.nauk: 01.04.07.Ufa.1998, 274 p. (in Russia).
- 21 R.A. Andrievskiy, Uspekhi khimi, 71 (10), 967-981 (2002). (in Russ).
- 22 B.S. Bokstein, G.D. Breze, P.V. Kurkin and L.I. Trusov, Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya, 1, 49-53 (2004). (in Russ).
- 23 V.F. Korshak, Yu.A. Shanovlov, P.V. Mateichenko and I.A. Danilina, Metallofizika. Noveishie tekhnologii, 30 (3), 385-396 (2008). (in Russ).
- 24 Yu.R. Kolobov and R.Z. Valiev Zernogranichnaya diffuziya i svoystva nanostrukturnykh materialov, (Novosibirsk: Nauka, 2001), 232p. (in Russ).
- 25 J. Cizek, I. Prochazka, R. Kuzel and R. Islamgaliev, Mondtsh. Chem., 133 (6), 873-887 (2002).