

PACSnumbers: 61.72.Hh, 61.72.Yx, 71.70.Ej, 75.30.Hx, 75.80.+q, 81.40.Lm, 81.40.Rs

Магнитопластический эффект в условиях испытаний на кинетическое индентирование

С. В. Сейдаметов, С. В. Лоскутов, М. О. Щетинина

*Запорожский национальный технический университет,
ул. Жуковского, 64,
69063 Запорожье, Украина*

Выполнено исследование влияния постоянного магнитного поля на процесс деформирования титанового сплава марки ВТЗ-1 в условиях испытаний на кинетическое индентирование. Дано объяснение полученным экспериментальным закономерностям на основе предположений о влиянии магнитного поля на спины электронов.

Виконано дослідження впливу постійного магнетного поля на процес деформування титанового сплаву марки ВТЗ-1 в умовах випробувань на кінетичне індентування. Дано пояснення одержаним експериментальним закономірностям на основі припущень про вплив магнетного поля на спіни електронів.

The influence of a stationary magnetic field on the deformation of titanium alloy VT3-1 at tests on kinetic indentation is studied. An explanation of the obtained experimental regularities based on assumption about the influence of magnetic field on the electron spins is performed.

Ключевые слова: магнитное поле, кинетическое индентирование, контактное электрическое сопротивление, магнитопластический эффект, эффект Зеемана.

(Получено 13 марта 2015 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Первые экспериментальные указания о возможностях электрических и магнитных полей оказывать воздействие на дефектную структуру кристаллической решётки неферромагнитных материалов появились достаточно давно и изложены в работах [1, 2]. В рабо-

те [3] впервые вводится понятие «магнитопластического эффекта», в [4] развиваются физические представления о механизме магнитопластичности, который заключается в откреплении дислокаций от парамагнитных центров под действием постоянного магнитного поля. Считается, что магнитное поле порождает изменения спинового состояния в системе дислокация–парамагнитный центр, завершающиеся снятием спинового запрета на определённый электронный переход, который радикально меняет конфигурацию дефектной системы, приводя к откреплению дислокаций от стопоров [4].

Практический и научный интерес представляют исследования влияния магнитного поля на пластичность таких конструкционных материалов как сплавы титана. Это обусловлено несколькими основными причинами. Во-первых, расширением физических представлений о взаимодействии ионной и электронной подсистем металлов. Во-вторых, возможностью использования магнитных полей для управления дефектной структурой металлов и, как следствие, прочностными и эксплуатационными характеристиками деталей машин. В-третьих, отсутствием единой и однозначной теории, объясняющей механизм влияния магнитного поля на процесс деформирования ферромагнитных материалов [5].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

В качестве материала для исследований был выбран конструкционный титановый сплав марки ВТЗ-1, широко применяемый в авиационной промышленности для изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей. Исследование влияния постоянного магнитного поля на процесс деформирования при испытаниях титанового сплава ВТЗ-1 в условиях кинетического индентирования выполнялось методом измерения контактного электрического сопротивления (КЭС) на специально разработанной и изготовленной экспериментальной установке. Функциональная схема установки показана на рис. 1. Установка состоит из узлов: статического нагружения, контактной пары, измерения нагрузки, измерения КЭС, постоянного магнитного поля. Узел статического нагружения состоит из редуктора (1) и приводного двигателя (2). Узел контактной пары состоит из испытуемого образца (3), который располагается на опорном стержне (4), и сферического индентора (5) диаметром 12,7 мм, изготовленного из стали марки ШХ15. Опорный стержень передаёт статическую нагрузку образцу от редуктора, он изолирован от заземлённых элементов конструкции для обеспечения нормальной работы схемы измерения сопротивления. Конструктивное исполнение опорного стержня ограничивает перемещения испытуемого образца по всем степеням свободы за исключением направления действия нагрузки.

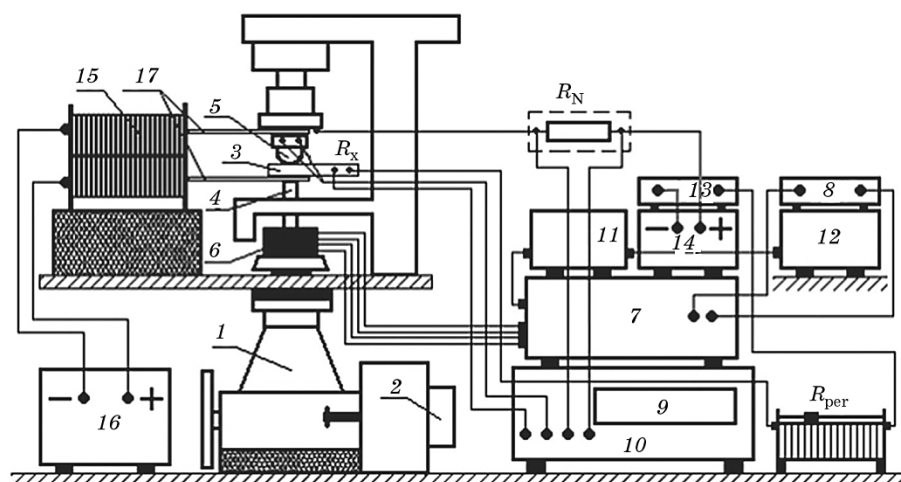


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для испытаний на кинетическое индентирование в постоянном магнитном поле (обозначения в тексте).

Статическая нагрузка узлу контактной пары передаётся через изолирующий стакан (6) с упругим элементом. На упругий элемент наклеены два тензодатчика, соединённые по схеме полумоста — один из них измерительный, второй, наклеенный на недеформируемую поверхность упругого элемента, предназначен для термокомпенсации первого. Сигнал от тензодатчиков усиливается тензоусилителем ТОПАЗ-3-01 (7) и измеряется цифровым милливольтметром (8). Упругий элемент с тензодатчиками, тензоусилитель и милливольтметр составляют узел измерения нагрузки.

Узел измерения КЭС состоит из цепи измеряемого R_x и образцового R_N сопротивлений, соединённых перемычкой, и цепи сравнения, расположенной в блоке БИ (9) моста постоянного тока Р3009 (10), работающего по схеме двойного моста МД-2. Измеряется сопротивление R_x между образцом и индентором. Напряжение раскомпенсации моста измеряется фотогальванометром автокомпенсационного типа, расположенным в блоке АК (11) с присоединённым к нему фотоусилителем, который расположен в блоке У (12). Фотоусилитель весьма чувствителен к механическим толчкам и вибрациям, поэтому его установили на специальной подставке, жёстко закреплённой на стене. Принцип работы фотогальванометра обеспечивает в установившемся режиме нулевой ток через измерительную диагональ моста. Для измерений КЭС через контактную пару пропускаться постоянный ток 2 А, который измерялся цифровым амперметром (13). Питание схемы моста осуществлялось от источника стабилизированного напряжения АГАТ (14).

Узел постоянного магнитного поля состоит из электромагнита (15) с источником питания постоянного тока ЛИПС (16), с помощью которого осуществлялось управление величиной индукции магнитного поля. В качестве концентраторов магнитного поля использовались два наконечника (17) с размерами $2 \times 30 \times 130$ мм³, вырезанные из пластин трансформаторной электротехнической стали. Нижний наконечник электромагнита размещался между опорным стержнем и образцом, верхний — между креплением индентора и верхней частью основания установки. При таком расположении наконечников направление вектора индукции магнитного поля совпадает с направлением действия статической нагрузки. Для обеспечения нормальной работы схемы измерения сопротивления оба наконечника электрически изолированы от заземлённых элементов конструкции слоем специального изоляционного покрытия. Чтобы исключить влияние магнитного поля на показания тензодатчиков, опорный стержень был выполнен из неферромагнитного материала.

Основные характеристики разработанной установки следующие: максимальная нагрузка — 3000 Н, скорость плавного статического нагружения — 0,4–22 мм/ч, диаметр индентора — 5–22,5 мм, размеры образцов: минимальные $5 \times 10 \times 10$ мм³, максимальные $10 \times 15 \times 40$ мм³, диапазон измеряемых сопротивлений от 10^{-7} до 10^6 Ом, относительная погрешность измерений сопротивления (в зависимости от скорости изменения измеряемой величины) — 0,01–0,5%.

Размеры подготовленных титановых образцов составляли $1,65 \times 11 \times 58$ мм³. Изменялись следующие параметры: КЭС, нагрузка на сферический индентор и время индентирования. Индукцию постоянного магнитного поля в зазоре между наконечниками измеряли магнитным резистором HW-300A-DF, градуировка которого осуществлялась при помощи измерителя магнитной индукции типа ИМИ-1 на электромагните с размерами полюсов 35×35 мм² и расстоянием между ними $d = 13$ мм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование влияния магнитного поля на процесс деформирования выполнялось на основе анализа графиков зависимостей контактной проводимости $1/R$ от величины нагрузки P в процессе упругопластического деформирования контактного сопряжения «образец–сферический индентор». На рисунке 2 показаны характерные зависимости, полученные при кинетическом индентировании двух различных участков поверхности титановых образцов в условиях нагружения с периодическим включением и выключением постоянного магнитного поля с индукцией $B = 0,15$ Тл. Макси-

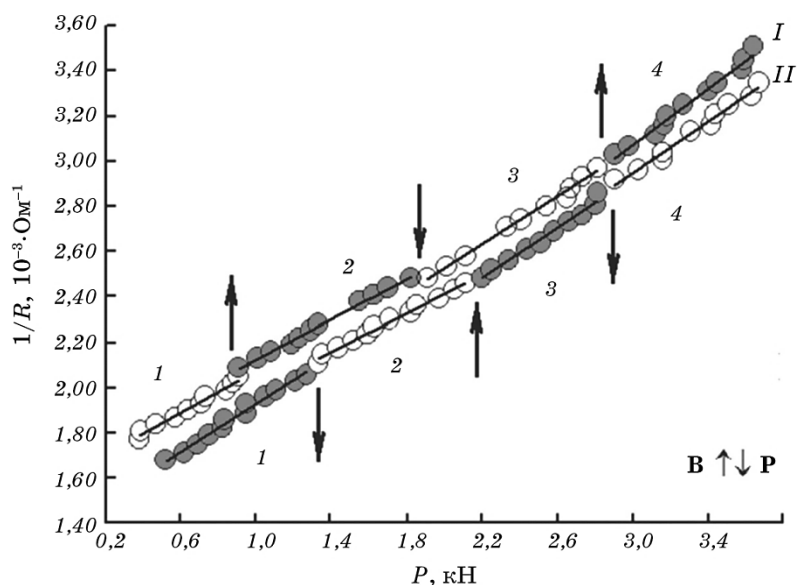


Рис. 2. Зависимость величины контактной проводимости от нагрузки для образцов из сплава титана ВТЗ-1 в условиях нагружения с периодическим включением и выключением постоянного магнитного поля с индукцией $B = 0,15$ Тл. Кривая I: участки 1 и 3 — без поля, участки 2 и 4 — в магнитном поле; кривая II: участки 1 и 3 — в магнитном поле, участки 2 и 4 — без поля.

мальная абсолютная погрешность, допущенная при измерениях контактной проводимости $1/R$, составляла $2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$. Как видно из графиков, включение магнитного поля во время индентирования приводит к изломам на кривых нагружения, что свидетельствует об изменении кинетики деформации.

Для объяснения полученных экспериментальных закономерностей влияния магнитного поля на пластичность сплава титана был выполнен анализ двух типичных участков нагружения образцов в магнитном поле и без поля (участки 2 и 3 на кривой II нагружения на рис. 2). Как видно из графика на рис. 3, для данной постоянной нагрузки $P = 3 \text{ кН}$ контактная проводимость $1/R$ при нагружении в магнитном поле больше контактной проводимости $1/R$ при нагружении без поля:

$$R^{-1} \Big|_{B=0,15 \text{ Тл}} > R^{-1} \Big|_{B=0} \quad (1)$$

или

$$R \Big|_{B=0,15 \text{ Тл}} < R \Big|_{B=0}. \quad (2)$$

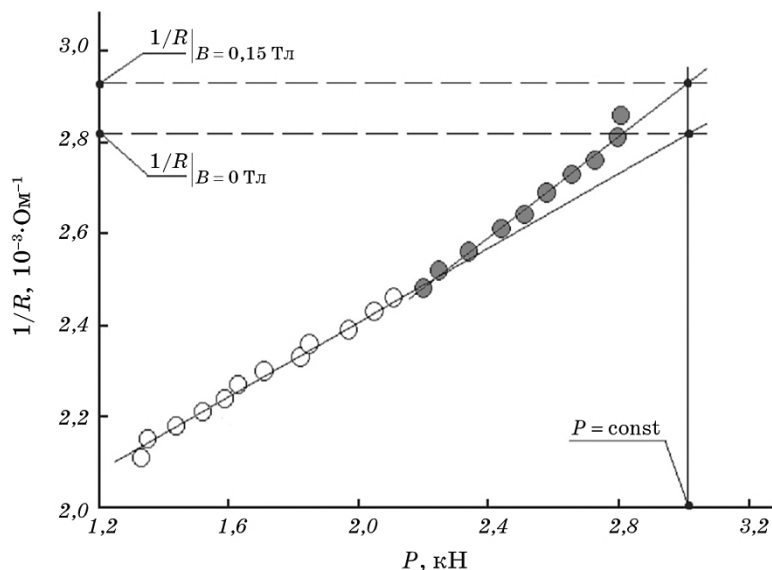


Рис. 3. Два типичных участка нагружения образцов в магнитном поле (заштрихованные маркёры) и без поля (незаштрихованные маркёры) для понимания механизма изменения пластичности.

Как известно, КЭС определяется фактической площадью контакта [6]. Таким образом, уменьшение КЭС при индентировании в магнитном поле, как это видно из неравенства (2), свидетельствует об увеличении фактической площади контакта, следовательно, пластичность материала исследуемого сплава титана увеличивается (имеет место магнитоэластический эффект).

Для количественной оценки вклада магнитного поля были рассчитаны значения нагрузки, которые необходимо приложить к образцу на участках индентирования в магнитном поле и без поля, для того чтобы получить одинаковое значение фактической площади контакта (рис. 4). Величина контактной проводимости $1/R$ при расчётах была принята равной $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$. Как видно из представленного графика, включение магнитного поля с индукцией $B \cong 0,15 \text{ Тл}$ во время индентирования эквивалентно действию дополнительной нагрузки:

$$P = P|_{B=0} - P|_{B=0,15 \text{ Тл}} = 4,2 - 4,0 \text{ кН} = 0,2 \text{ кН} = 200 \text{ Н}, \quad (3)$$

что соответствует снижению деформирующего усилия на 10%.

На рисунке 5 для сравнения представлена кривая деформирования ионных кристаллов в моменты включения и выключения магнитного поля с индукцией $B = 0,7 \text{ Тл}$, полученная Головиным и Моргуновым [7].

Для объяснения природы структурных перестроек сплава титана ВТЗ-1 в магнитном поле рассмотрим механизмы влияния магнитного поля на электронную структуру титана.

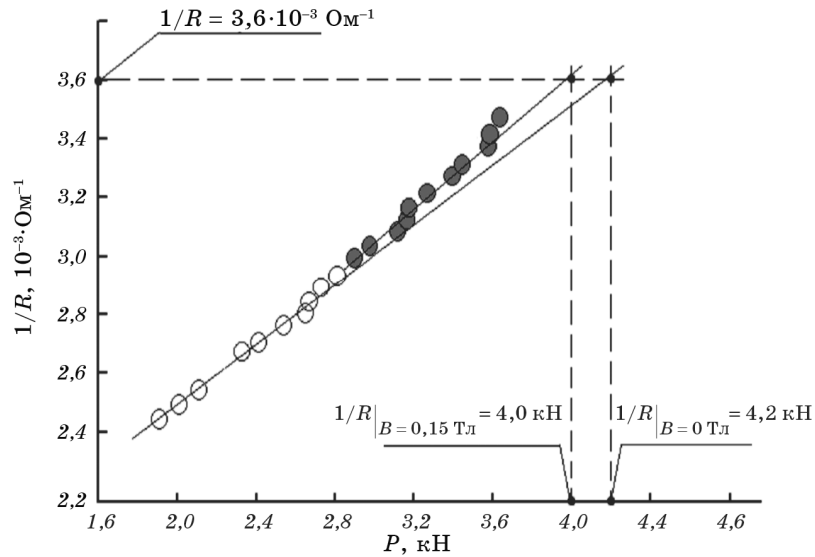


Рис. 4. Два типичных участка нагружения образцов в магнитном поле (заштрихованные маркёры) и без поля (незаштрихованные маркёры) для количественной оценки вклада постоянного магнитного поля.

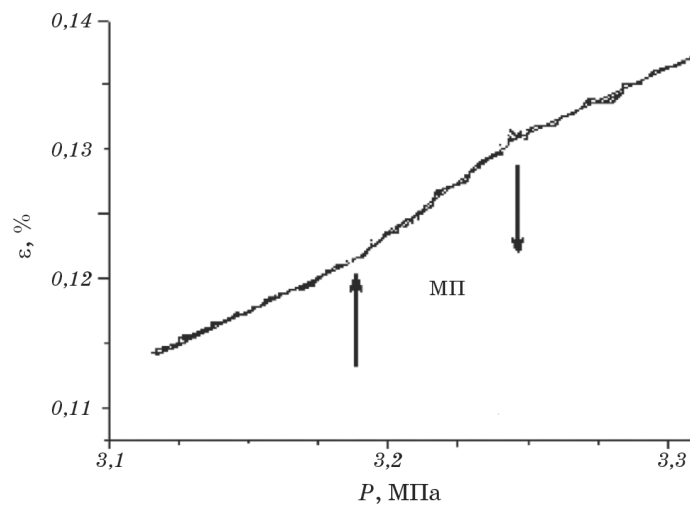


Рис. 5. Участки кривых деформирования ионных кристаллов NaCl:Ca в моменты включения и выключения постоянного магнитного поля с индукцией $B = 0,7$ Тл [7].

Как известно, поведение атома в образовании связей с соседними атомами определяют электроны, расположенные на его внешних электронных оболочках. При сближении атомов электронные облака, образованные этими электронами, приходят в соприкосновение в первую очередь. Кроме внешних электронов, участие в образовании связей с соседними атомами может принимать и часть электронов предвнешнего (предпоследнего) слоя. Однако это возможно лишь в том случае, если они обладают энергией, не сильно отличающейся от энергии внешних электронов. У атома титана, который относится к переходным d -элементам, лишь небольшая часть валентных электронов (s -электроны) делокализована по всему кристаллу, обеспечивая металлическую связь. Остальные (d) электроны участвуют в образовании направленных ковалентных связей между соседними атомами [8]. Таким образом, титан в кристаллическом состоянии обладает не чисто металлической связью, а ковалентно-металлической. Благодаря такому удачному сочетанию ковалентной и металлической связей титан обладает высокой твёрдостью и температурой плавления.

Порядок заполнения электронных оболочек атома титана в зависимости от энергии подуровней представлен на рис. 6.

Поскольку собственные магнитные моменты атомов переходных металлов определяются, в первую очередь, спиновыми моментами электронов (спинами), нескомпенсированными в незаполненных $3d$ -оболочках, необходимо рассматривать воздействие магнитного поля на электронные спины. Согласно принципам квантовой механики устойчивое состояние атома сохраняется лишь в основном состоянии, которому соответствует минимум суммарной энергии всех электронов атома. Возбуждённые состояния атомов, как известно, образуются из основного состояния при переходе одного или нескольких электронов с занятых орбиталей на свободные (или занятые лишь одним электроном). Схема распределения валентных электронов по энергетическим уровням в атоме титана в основном и возбуждённом состоянии представлена на рис. 7. Как видно из ри-

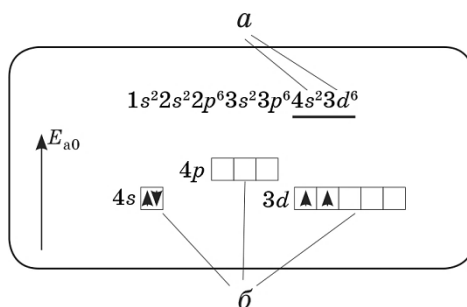


Рис. 6. Валентные электроны (a) и валентные подуровни ($б$) атома титана.

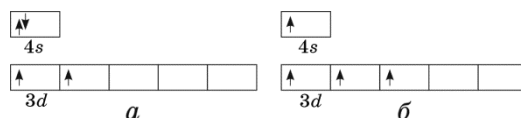


Рис. 7. Распределение валентных электронов в атоме титана по энергетическим уровням: основное состояние (*а*), возбуждённое состояние, инициируемое внешним магнитным полем (*б*).

сунка, электронная $3d$ -оболочка атома титана в основном состоянии заполнена не полностью. Она содержит 2 электрона из 10 возможных. В возбуждённом состоянии, инициируемом внешним магнитным полем, один электрон с $4s$ -орбитали перескакивает на $3d$ -орбиталь.

Оценки изменения энергии уровней $3d$ -электронов атома титана в слабом магнитном поле с индукцией $B = 0,15$ Тл во время испытаний на кинетическое-indentирование показали удовлетворительное согласование энергии Зеемана $\Delta E_{JH} = \mu_B g m_J B \cong (0,5 - 1,0) \cdot 10^{-5}$ эВ с магнитной энергией $w_{ат} \cong 10^{-6}$ эВ/атом, приходящийся на один атом титана. Поскольку магнитное поле с индукцией $B \leq 1$ Тл считается слабым [9], при расчётах энергии Зеемана учитывалось, что полный магнитный момент атома взаимодействует с магнитным полем как единое целое, а спин-орбитальная связь не разрывается (сложный эффект Зеемана [10]). При расчётах объёмной плотности магнитной энергии предполагалось, что титан является изотропным магнетиком [11].

Известно, что изменение электронной структуры атомов при переходе из основного в возбуждённые состояния приводит к изменению их геометрии, т.е. равновесных расстояний между атомами [8]. Таким образом, можно предположить, что магнитное поле, воздействуя на спины электронов, приводит к флуктуационным изменениям энергии ковалентной связи атомов титана, которые под действием внутренних напряжений кристаллической решётки или во время деформации способствуют откреплению дислокаций от локальных стопоров.

4. ВЫВОДЫ

Обнаружено увеличение пластичности материала сплава титана марки ВТЗ-1 при испытаниях на кинетическое-indentирование в постоянном магнитном поле с индукцией $B = 0,15$ Тл. Показано, что включение постоянного магнитного поля эквивалентно снижению деформирующего усилия на 10%. Обнаруженные экспериментальные закономерности можно объяснить ослаблением магнитным полем связей дислокаций с локальными стопорами, которые тормозят

их движение.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Загоруйко, *Кристаллография*, **10**, № 1: 81 (1965).
2. E. J. Sharp and D. A. Avery, *Phys. Rev.*, **158**, No. 2: 511 (1967).
3. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Т. М. Прекалина, А. А. Урусовская, *Физика твёрдого тела*, **29**, № 2: 467 (1987).
4. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Е. А. Петржик, *Известия вузов. Чёрная металлургия*, № 10: 85 (1990).
5. М. А. Васильев, *Успехи физики металлов*, **8**, № 1: 65 (2007).
6. В. В. Левитин, С. В. Лоскутов, *Способ определения фактической площади касания сопряжённых токопроводящих деталей*, А.с. № 1430820 СССР (G01N3/56) (1973).
7. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, *Письма в ЖЭТФ*, **61**, № 7: 583 (1995).
8. В. Ю. Ирхин, Ю. П. Ирхин, *Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d- и f-металлах и их соединениях* (Екатеринбург: УрО РАН: 2004).
9. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, *Вестник Тамбовского государственного университета*, **2**, № 3: 243 (1997).
10. Ч. Киттель, *Введение в физику твёрдого тела* (Москва: Наука: 1978).
11. С. В. Вонсовский, *Магнетизм* (Москва: Наука: 1971).

REFERENCES

1. N. V. Zagoruyko, *Kristallografiya*, **10**, No. 1: 81 (1965) (in Russian).
2. E. J. Sharp and D. A. Avery, *Phys. Rev.*, **158**, No. 2: 511 (1967).
3. V. I. Al'shits, E. V. Darinskaya, T. M. Prekalina, and A. A. Urusovskaya, *Fizika Tverdogo Tela*, **29**, No. 2: 467 (1987) (in Russian).
4. V. I. Al'shits, E. V. Darinskaya, and E. A. Petrzhik, *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya*, No. 10: 85 (1990) (in Russian).
5. M. O. Vasiliev, *Uspehi Fiziki Metallov*, **8**, No. 1: 65 (2007) (in Russian).
6. V. V. Levitin and S. V. Loskutov, *Sposob Opredeleniya Fakticheskoy Ploshchadi Kasaniya Sopryazhennykh Tokoprovodyashchikh Detaley [Method for Determination of Actual Area of Current-Conducting Details]*, Patent No. 1430820 USSR (G01N3/56 SSSR) (1973) (in Russian).
7. Yu. I. Golovin and R. B. Morgunov, *Pis'ma v ZhETF*, **61**, No. 7: 583 (1995) (in Russian).
8. V. Yu. Irkhin and Yu. P. Irkhin, *Elektronnaya Struktura, Fizicheskie Svoystva i Korrelyatsionnye Effekty v d- i f-Metallakh i Ikh Soedineniyakh [Electronic Structure, Physical Properties, and Correlation Effects in d- and f-Metals and Their Compounds]* (Yekaterinburg: UrO RAN: 2004) (in Russian).
9. Yu. I. Golovin and R. B. Morgunov, *Vestnik Tambovskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, **2**, No. 3: 243 (1997) (in Russian).
10. Ch. Kittel, *Vvedenie v Fiziku Tverdogo Tela [Introduction to Solid State Physics]* (Moscow: Nauka: 1978) (Russian translation).
11. S. V. Vonsovsky, *Magnetism* (Moscow: Nauka: 1971) (in Russian).