



УДК 669.141

Р.Б. Абылкалыкова, Л.И. Квеглис, А.К. Сулейменова

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

В.С. Жигалов

Институт физики СО РАН, г. Красноярск

Ф.М. Носков

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СТАЛИ 110Г13Л

Известно, что механические свойства большинства материалов испытывают значительные изменения в области субмикронных масштабов [1]. Особенно сильные изменения наблюдаются на уровне нанометрового размера. Отсюда очевидна необходимость выяснения физических причин и механизмов тех кинетических процессов, которые проходят в условиях локализации деформации.

В данной работе исследуется аустенитная сталь Гад菲尔да 110Г13Л (1,1 % C, 13 % Mn, остальное Fe). В предыдущей нашей работе [2] показано, что при динамическом нагружении в межзеренной межграницной прослойке этой стали появляется кластерная структура Франка-Каспера типа ФК12+ФК14. Такая структура может быть результатом высокой упорядоченности групп тетраэдров. Свойства этой структуры практически не изучены.

Существует два основных направления получения новых свойств в металлических сплавах: 1) понижение размерности образцов (либо структурных блоков, из которых они состоят), 2) переход к упорядоченным структурам.

Внутреннее состояние системы характеризуется величиной ее плотности. Зарождение новой фазы (интерметаллической) в области градиента концентрации осуществляется благодаря термодинамическим и кинетическим причинам. До сих пор предполагалось, что молярный объем не зависит от концентрации. Если это не так, то в твердом теле флуктуации состава будут сопровождаться упругими напряжениями, которые дадут вклад в полную свободную энергию системы. Эта гипотеза, высказанная в работе [1], блестяще подтвердилась серией работ, например [3]. В магнитострикционных материалах упругие напряжения приводят к изменению структуры и магнитных свойств в локализованных областях нанометрового масштаба.

Целью данной работы было показать, что появление эффекта самоупрочнения и спонтанной намагниченности в аустенитной стали 110Г13Л связано с формированием нанокластеров с тетраэдрически плотноупакованной структурой в межграницной межзеренной прослойке.

Образцы стали Гад菲尔да получены на АО «Востокмашзавод» (г. Усть-Каменогорск). Были взяты стандартные по размеру «свидетели» из 56 плавок и подвергнуты ударному нагружению в маятниковом копре с целью определения ударной вязкости. Состав сплава Fe-Mn-C контролировался методами спектрального, рентгеноспектрального флуорес-

центного и химического анализов. Образцы были получены методом электродуговой плавки и подвергнуты следующей термообработке: перед закалкой на аустенит от 1150 °C образцы подвергались отжигу при температуре 800-850 °C.

Структуру поверхности образцов после ударного нагружения исследовали с помощью световой оптической микроскопии и рентгеноструктурного анализа. С помощью методов растровой и просвечивающей электронной микроскопии исследовали микроструктуру и микросостав образцов стали 110Г13Л. Температурные исследования магнитных свойств образцов стали 110Г13Л проводили в магнитометре в поле 1кЭ. Магнитную анизотропию измеряли в крутильном магнитометре.

С помощью световой оптической микроскопии поверхности шлифов 56 образцов стали 110Г13Л установлена связь между величиной коэффициента ударной вязкости и структурой (рис. 1, а, б). В образцах с большим содержанием полос сдвиговой деформации ударная вязкость в несколько раз больше, чем в образцах, где эти полосы занимают незначительную часть поверхности. Исследование микротвердости по методу Виккерса показало, что микротвердость межзеренной границы равна 4830 МПа, а микротвердость основного зерна аустенита равна 3460 МПа.

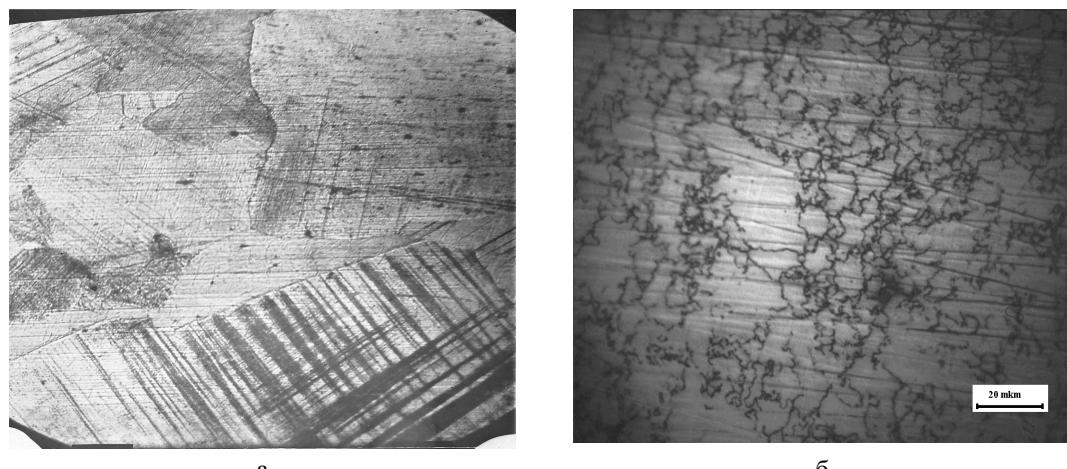


Рисунок 1 - Образцы стали 110Г13Л с различной ударной вязкостью: а - образец № 1613, на поверхности образца хорошо выражена структура с четкой межзеренной границей, также видна большая плотность полос сдвиговой деформации, все это говорит о высокой ударной вязкости - 300 МПа·с; б - образец № 1722, на поверхности образца видна структура без полос сдвиговой деформации, наблюдается большое количество карбидных включений (карбидная сеть), это соответствует низкому коэффициенту ударной вязкости - 80 МПа·с

Сталь 110Г13Л известна как антиферромагнитный инвар [5]. Из построенной температурной зависимости намагниченности насыщения (рис. 2) видно, что образец 110Г13Л с ударной вязкостью 300 МПа·с имеет антиферромагнитную структуру, типичную для ферритов (например, Ni-Mn-Ti, Mn-Fe-Cr) [6, 7]. Кроме того, видно, что материал - сталь Гад菲尔да после ударного нагружения - имеет неоднородную магнитную структуру. В той подрешетке, где не достигнуто насыщение, спиновые упорядоченности легко нарушаются с повышением температуры. Результирующая намагниченность быстро нарастает за счет того, что каждая из подрешеток по-разному намагничена в исходном состоянии и по-разному зависит от температуры. В области температуры 220 К наблюдается скачок намагниченности. Такого скачка намагниченности не наблюдается в образце с ударной

вязкостью 50 МПа·с, хотя общий характер кривой сохраняется.

Sample1 ($H_{magnetiz} = 26.6$ kOe // sample plate)

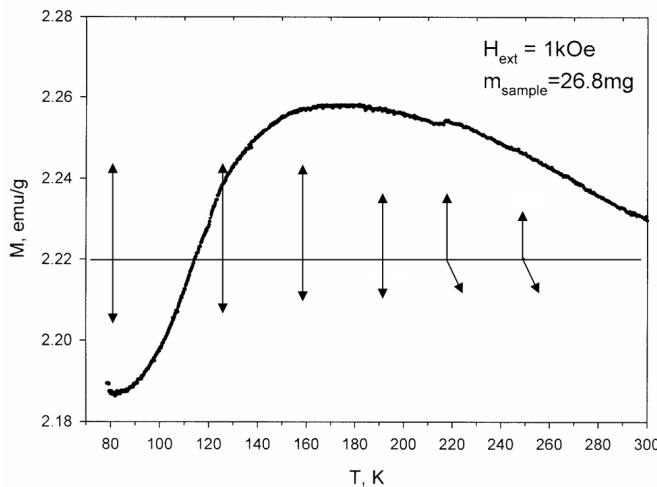


Рисунок 2 - Зависимость намагниченности от температуры плоского образца стали Гад菲尔да в поле 1кЭ, образец подвергался намагничиванию 26,6 кЭ в плоскости наибольшего размера

Исследования структуры излома стали 110Г13Л проводились на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV. Сталь с низкой ударной вязкостью имеет хрупкий излом, сталь с высокой ударной вязкостью имеет типичный вязкий излом. На дне кратера при вязком изломе образуются частицы. Для выяснения особенностей химического состава вязкого излома были сняты спектры (рис. 3) с помощью энергодисперсионной приставки INCA Energy в растровом электронном микроскопе.

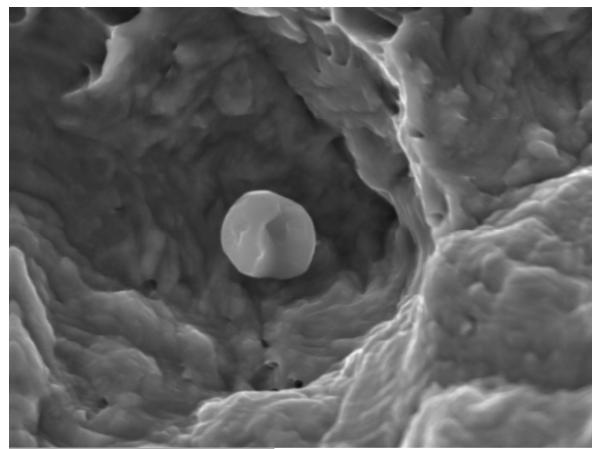


Рисунок 3 - Вязкий излом с частицей, обогащенной марганцем

Спектральный анализ в зоне разрыва показал, что частица обогащена марганцем в несколько раз больше, чем на стенке кратера. Энергодисперсионные спектры с различных участков вязкого излома представлены на рис. 4 а,б. При оценке энергодисперсионных спектров можно сделать вывод, что в процессе динамического нагружения происходит механохимическая реакция, в результате которой формируются частицы, обогащенные

марганцем.

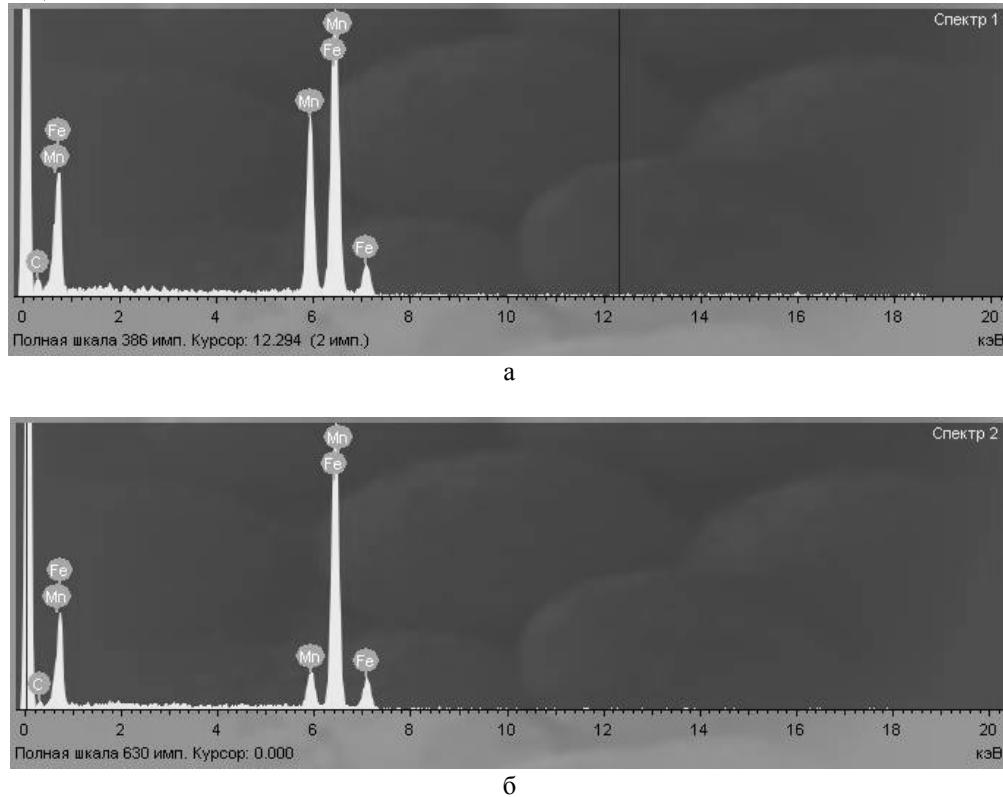


Рисунок 4 - Энергодисперсионные спектры с различных участков вязкого излома: а – с частицы на дне кратера; б – на стенке кратера

На основании расшифровки рентгенограмм, полученных с участка образца с большой плотностью полос сдвиговой деформации, показано присутствие фазы, имеющей структуру Франка-Каспера. В нашей предыдущей работе [2] предполагалось, что аустенитная сталь Гад菲尔да с увеличенным параметром решетки аустенита модифицирована икосаэдрической фазой. Зародыши такой фазы возникают при ударном нагружении в зоне полос сдвиговой деформации. Икосаэдрическая фаза инициирует формирование упорядоченной структуры β -MnFe в стали Гад菲尔да. Об этом свидетельствует выделение частиц, обогащенных марганцем, в центрах кратеров вязкого излома (рис. 3, 4). Обращает на себя внимание тот факт, что в течение короткого времени – удара и отрыва – достаточно большое количество атомов марганца успевает сосредоточиться в частице, размер которой составляет несколько микрон. Согласно диаграмме фазовых равновесий [8] содержание марганца в структуре β -MnFe составляет 64-67 ат. %, что значительно превышает среднее содержание марганца в стали Гад菲尔да. При этом стенки кратера оказываются обедненными марганцем.

Любой твердофазный процесс осуществляется благодаря диффузии, однако механизмы диффузии являются предметом острых дискуссий. Это происходит в основном из-за сложности проверки механизмов диффузии экспериментальным путем. В работе [9] с помощью электронного микроскопа показано, что механизм трансформации обедненных атомами зон в тетраэдры дефектов упаковки заключается в образовании согласованных

смещений тетраэдрических групп атомов в направлении {111} в область с избыточным свободным объемом. Впервые такая межзеренная межфазная граница с тетраэдрически плотно упакованной структурой типа Франк-Каспера ФК12 обнаружена в массивных образцах нержавеющей стали [10]. Важной особенностью такой структуры является возможность сжатия-растяжения ее элементарного объема до 30 % [11].

Механическое нагружение может возбуждать реакционную способность. Нагрузка создает сдвиг, который приводит к переключению химических связей и изменяет симметрию кристаллической фазы. Проблема механической модификации структуры в процессе динамического нагружения порошковой смеси рассмотрена в работе [12]. Результатом таких реакций являются наноструктурные образования, не имеющие аналогов в объемных материалах. Возникают концентрационные зоны наноструктурных продуктов реакции ударного синтеза [13].

На основании расшифровки рентгенограмм, полученных с участка образца с большой плотностью полос сдвиговой деформации, авторы [14] делают вывод о присутствии ϵ -фазы мартенсита с гексагональной решеткой. Однако приведенная в их работе рентгенограмма не соответствует гексагональной структуре. В работе [10] в зоне сдвиговой деформации получены электронограммы, соответствующие структуре Франка-Каспера типа ФК12. Мы считаем, что и в полосах сдвиговой деформации в стали Гад菲尔да может формироваться структура Франка-Каспера.

Существует большой класс процессов упорядочения через неустойчивость и рост флуктуаций в неравновесных термодинамических системах. Например, спинодальный распад может предшествовать упорядочению, то есть, упорядочение возникает через неустойчивость. По мнению авторов [3], не исключена возможность изменения последовательности механизмов в этих системах при изменении состава сплавов и режима термообработки.

В нашем эксперименте присутствуют оба эффекта, которые приводят к получению новых свойств в металлических сплавах - понижение размерности структурных элементов образца и образование атомно-упорядоченных структур. Понижение размерности структурных элементов в образцах стали Гад菲尔да происходит за счет образования локализованных областей сдвиговой деформации. Внутри таких областей происходит переход к упорядоченным структурам типа Франка-Каспера.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии показано, что в процессе ударного нагружения в стали 110Г13Л происходит перераспределение химического состава материала в локальных областях, приводящее к образованию структурных и магнитных неоднородностей.
2. В областях с локализованными неоднородностями происходит возникновение и развитие наноструктурных кластеров с новыми физическими свойствами.
3. Увеличение коэффициента ударной вязкости возможно благодаря формированию кластеров со структурами Франка-Каспера как в межзеренных границах, так и в зонах сдвиговой деформации.

Список литературы

1. Головин Ю.И. Кинетические особенности деформации твердых тел вnano- и микрообъемах / Ю.И. Головин, С.Н. Дуб, В.И. Иволгин, В.В. Коренков, А.И. Тюрин. - ФТТ, 2005. - 47. - Вып.6. - С.962-973.
2. Казанцева В.В. Сплавы железо-марганец-углерод с аномальным объемом кристаллической

- решетки / В.В. Казанцева, Ф.М. Носков, Р.Б. Абылкалыкова, У.А. Рахимова, В.А. Мусихин, Н.Л. Зайцев, Т.А. Меньшикова Л.И. Квеглис // Известия РАН, сер. Физическая, 2008. - Т. 72. - № 8. - С. 1256-1258.
3. Скрипов В.П. Спинодальный распад (Фазовый переход с участием неустойчивых состояний) /В.П. Скрипов, А.В. Скрипов //Успехи физических наук, 1979. - Июнь. - Вып. 2. - Т. 128. - С. 193-231.
4. Вальков В.И. Влияние давления на устойчивость магнитоупорядоченных состояний в сплавах системы Mn_{2-x}Fe_xAs_{0,5}P_{0,5} / В.И. Вальков, Д.В. Варюхин, А.В. Головчан, И.Ф. Грибанов, А.П. Сиваченко, В.И. Каменев, Б.М. Тодрис // Перспективные материалы. - Вып. 9. - Сент. 2008. - Т. 34. - С. 927-941.
5. Седов В.Л. Антиферромагнетизм гамма железа Проблема инвара. - М.: Наука, 1987.
6. Тикатзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. - М., 1983.
7. Бозорт Р. Ферромагнетизм /Пер. с англ. Е.И. Кондорского. - М., 1956.
8. Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем. - М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1959. - Т. 2.
9. Matsukawa Y., Zinkle S.J. Dynamic observation of the collapse process of a stacking faulttetrahedron by moving dislocations //Journal of nuclear materials - 2004. - V. 329-333. - P. 919-923.
10. Sidhom H., Portier R., An icosaedral phase in annealed austenitic stainless steel // Philosophical Magazine Lett. - 1989. - V.59. - №. 3. - P.131-139.
11. Пирсон У. Кристаллохимия и физика металлов и сплавов. - М.: Мир, 1977. - Т. 1. - 424 с. - Т. 2. - 472 с.
12. Smolyakov V.K., Comb. Explosive Shock Waves 41. - 2001. - P.319.
13. Leitsin V.N., Dmitrieva M.A. Chemistry in interests of steady development 13. - 2005. - P.271.
14. H.C. Lin, T.P. Wang, K.M. Lin, C.Y. Chung, P.C. Wang and W.H. Ho Received 6 July 2007; revised 12 November 2007.

Получено 20.04.09

УДК 519.86:556

Р.Б. Абылкалыкова, Л.И. Квеглис, Э.Т. Суийндина, Н.В. Никифорова
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

В.С. Жигалов

Институт физики СО РАН, г. Красноярск

Ф.М. Носков

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ И МАГНИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СПЛАВЕ Ni₃Al

Актуальность исследований сплавов системы Ni-Al связана с широким использованием этих сплавов как конструкционных материалов в машиностроении. Одна из самых главных особенностей сплавов Ni-Al является положительная температурная зависимость предела текучести. Интерметаллид Ni₃Al имеет всевозрастающее применение в авиационной и космической промышленности из-за легкости, прочности и жаростойкости.

Из литературы известно, что мартенситный механизм фазовых превращений в указанных сплавах предполагает исключительную роль сдвиговых деформаций в инициировании фазовых превращений. Поэтому можно ожидать образования новых фаз под действием механических нагрузок. Структурно-энергетическая трансформация трехмерного кристалла Ni₃Al исследовалась методом молекулярной динамики [1]. Авторами обнаружена перестройка атомно-упорядоченной фазы Ni₃Al с образованием кластеров, обогащенных никелем при растягивающей нагрузке.

В качестве объекта исследования был взят модельный бинарный сплав Ni₃Al. Сплав имеет кубическую г.ц.к. решетку, соответствующую сверхструктуре L1₂. Размер расчет-

ногого блока составлял 120 атомов, на границы расчетного блока накладывались различные граничные условия вдоль направлений $<100>$, $<010>$ – свободные, $<001>$ – жесткие. Свободные граничные условия составляют приграничные атомы, при использовании жестких граничных условий координаты граничных атомов зафиксированы (рис. 1).

Структурные превращения в монокристаллах сплава Ni₃Al моделировались при активной пластической деформации. Под действием внешней силы кристалл был нагружен в направлениях $<001>$, $<00\bar{1}>$. Для обеспечения устойчивости расчета системы его осуществляли при комнатной температуре (T=300 K). Деформация кристалла происходила в результате смещения атомов жесткой границы со скоростью деформации 0,02 нм/пс, до тех пор, пока не происходил разрыв на две части кристалла (рис. 1, внизу). До разрушения кристалла время активного нагружения составило 147 пс, истинная деформация равна 0,2.

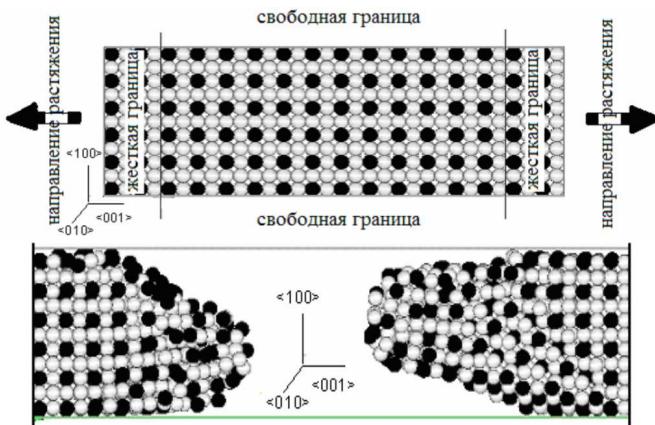


Рисунок 1 - Исходная конфигурация сплава Ni₃Al до начала растяжения в направлении $<001>$ (вверху) и конечная конфигурация сплава после разрушения кристалла. Вертикальные линии отделяют атомы, составляющие жесткие границы. Сфера черного цвета – атомы Al, белого – Ni. Стрелками указано направление нагружения [1]

В гранецентрированных кубических кристаллах, имеющих четыре системы плоскостей скольжения, {111} пересекающихся друг с другом, невозможно ориентировать кристалл относительно оси растяжения, чтобы касательное напряжение было равно нулю во всех этих плоскостях. По крайне мере, одна система плоскостей неизбежно оказывается ориентированной благоприятно для скольжения. Разрушению кристалла с гранецентрированной решеткой при нагружении всегда предшествует развитие пластической деформации.

Результаты расчетов проиллюстрированы на нижней части рис. 1, где видны скопления атомов никеля в области разрыва.

Целью данной работы являлось исследование процессов быстропротекающей диффузии, структурных и магнитных превращений в сплавах Ni₃Al в результате растягивающей нагрузки.

Исследования проводились на образцах сплава Ni-Al с содержанием никеля - 75 ат. % и алюминия - 25 ат. %.

Образцы Ni₃Al после выдержки при температуре 1150 °C подвергались закалке в воду, а затем статическому растягивающему нагружению в течение 40 минут до разрыва. На рис. 2 слева расположена часть образца, вырубленная из области разрыва, справа –

часть образца, закрепляемая в установке.

Измеряли крутящие моменты обеих частей образца в магнитометре. Магнитное поле магнитометра составляло 6 кЭ, чувствительность магнитометра составляет $3,75 \times 10^{-3}$ эрг.

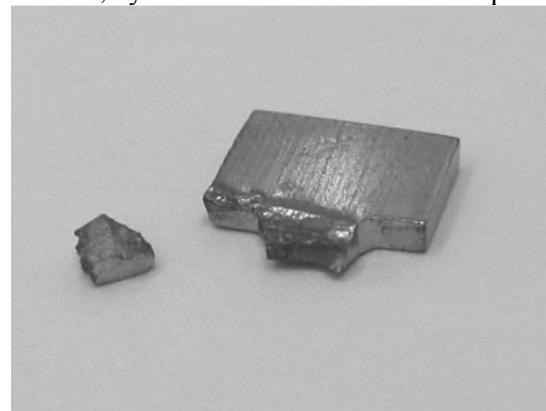


Рисунок 2 - Образец Ni₃Al: слева – часть образца, вырубленная из области разрыва; справа – часть образца, закрепляемая в установке для разрыва

Из кривых крутящих моментов (рис. 3) следует, что часть образца, вырубленная из области разрыва, обладает значительно большим магнитным моментом, чем часть образца, удаленная от разрыва.

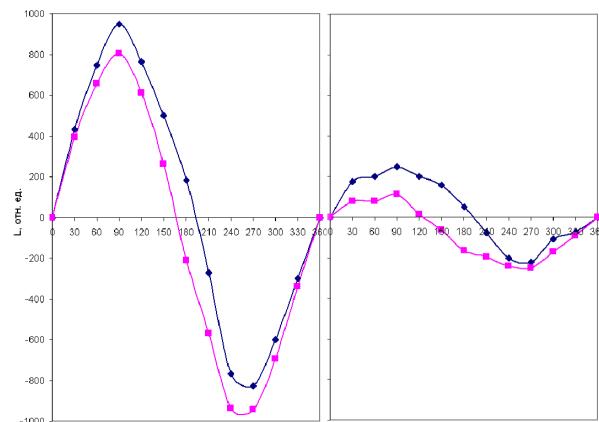


Рисунок 3 - Кривые крутящих моментов, полученные от разных участков разорванного образца: слева – от маленького кусочка, отделенного от области разрыва; справа – от большого кусочка, находящегося на периферии области разрыва

Согласно диаграмме фазовых равновесий, приведенных в работе [2], намагниченность сплава Ni-Al при комнатной температуре близка к нулю для исследуемых составов. Соединение Ni₃Al неферромагнитно.

Части разорванного образца были исследованы методами оптической, электронной микроскопии (рис. 4) и рентгеновской дифракции.

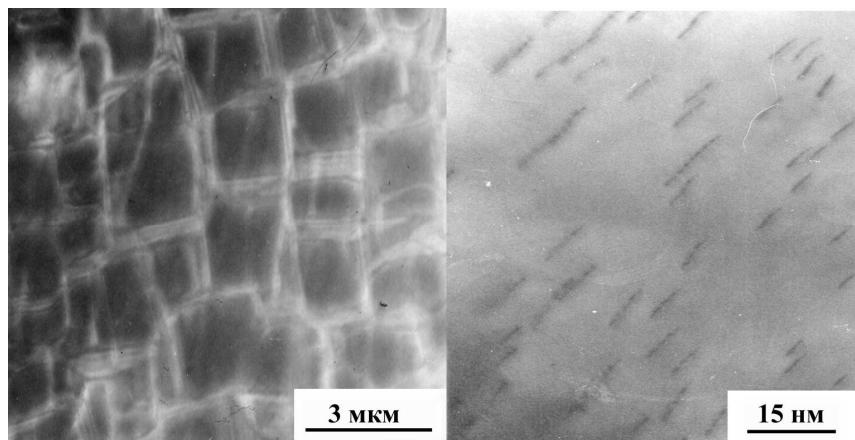


Рисунок 4 - Электронно-микроскопические изображения деформированного участка в области разрыва образца Ni_3Al . Ориентация монокристаллов: ось зоны {110} перпендикулярна плоскости образца

На рис. 4, слева показано электронно-микроскопическое изображение деформированного участка образца Ni_3Al , имеющего структуру $\text{L}1_2$. Образец утоняли методом струйной полировки. Справа показан увеличенный фрагмент одного зерна, где видно, что скопления дислокаций ориентированы вдоль единственного направления. Естественно предположить, что это направление является направлением растяжения.

После механических испытаний область разрыва образцов Ni_3Al исследовали с помощью растровой электронной микроскопии. Методом растровой электронной микроскопии (JSM-6390LA) и микроанализа обнаружено, что в зоне разрыва образуются частицы, обогащенные никелем, и имеющие размер порядка 1 мкм.

Сделан энергодисперсионный анализ и получен спектр, приведенный на рис. 5 справа, который свидетельствует, что на дне кратера разрыва обнаружена частица никеля (Ni).

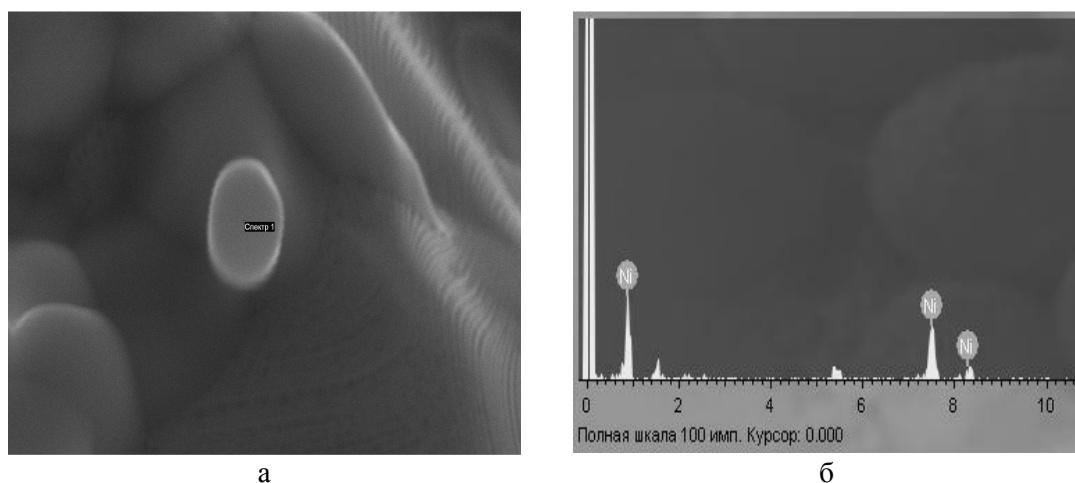


Рисунок 5 – а) изображение в растровом электронном микроскопе частицы никеля, возникшей на дне кратера после разрыва образца, б) – энергодисперсионный спектр частицы никеля [3]

Очевидно, что метод молекулярной динамики, несмотря на свою наглядность, достаточно далек от реального эксперимента из-за небольшого количества рассматриваемых атомов.

Реальный эксперимент (энергодисперсионный спектр) дает области, обогащенные никелем, размером порядка один микрон.

Поэтому возникла необходимость моделировать этот процесс другим методом - методом разностных схем.

Процесс образования кластеров, обогащенных никелем на границе разрыва растягиваемого образца сплава Ni₃Al, можно описать для одномерного случая дифференциальным уравнением переноса – диффузии [4]:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} + \frac{v \cdot \partial C(x,t)}{n \cdot \partial x} = \frac{D \cdot \partial^2 C(x,t)}{n \cdot \partial x^2}, \quad (1)$$

где $C(x,t)$ – концентрация атомов никеля; v – скорость перемещения атомов никеля под действием нагрузки; D – суммарный коэффициент диффузии, n – плотность дислокации, x – длина $0 \leq x \leq l$, t – время.

Первый член левой части данного уравнения – изменение концентрации по длине во времени, второй член левой части уравнения описывает процесс перемещения атомов никеля по вакансиям и дислокациям к середине образца. Правая часть уравнения описывает процесс диффузии.

Уравнение (1) решается разностным методом при заданных граничных условиях:

$$C(x,0)=\varphi(x), \quad C(0,t)=\psi_1(t), \quad C(l,t)=\psi_2(t), \quad (2)$$

где $\varphi(x)$ – начальное распределение концентрации по длине, $\psi_1(t)$, $\psi_2(t)$ – распределение концентрации по времени на границах.

Уравнение решается при помощи разностной схемы:

$$c_i^{j+1} = \lambda c_{i+1}^j + (1 - 2\lambda - U)c_i^j + (\lambda + U)c_{i-1}^j, \quad (3)$$

где $U = v\tau/nh$, $\lambda = D\tau/nh^2$, τ – шаг по времени, h – шаг по длине.

Данная разностная схема устойчива при условии $2\lambda + U \leq 1$. Здесь оба слагаемых – безразмерные величины. Однако λ – это приведенная скорость диффузии, а U – приведенная скорость направленного движения атомов. Наложенное условие означает, что скорость диффузии рассматривается как скорость хаотического движения атомов, а направленное движение атомов происходит только в одну сторону – по направлению к центру растущей из сплава частицы никеля. Согласно результатам работы [1], атомы меньшего диаметра – атомы никеля – устремляются в сторону скопления вакансий, формирующихся в процессе растяжения образца. В результате образуется частица, обогащенная никелем. Она «заличивает» свободный объем до наступления разрыва образца.

Скорость перемещения атомов в середине частицы никеля меняет направление, то есть атомы движутся к середине с двух сторон. Для описания этой ситуации использовалась разностная схема, состоящая из трех частей:

$$\begin{aligned} 0 \leq x < l/2 & - c_i^{j+1} = \lambda c_{i+1}^j + (1 - 2\lambda - U)c_i^j + (\lambda + U)c_{i-1}^j, \\ x = l/2 & - c_i^{j+1} = (\lambda + U)c_{i+1}^j + (1 - 2\lambda)c_i^j + (\lambda + U)c_{i-1}^j, \\ l/2 < x \leq l & - c_i^{j+1} = (\lambda + U)c_{i+1}^j + (1 - 2\lambda - U)c_i^j + \lambda c_{i-1}^j. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь первое и третье уравнения описывают движение атомов слева и справа от центра частицы, соответственно. Второе уравнение описывает процесс в центре частицы.

Расчеты были сделаны в электронных таблицах Excel. Исходная концентрация атомов никеля принята за единицу. На графиках показаны результаты расчетов – зависимость концентрации атомов никеля от пространственной координаты x . На рис. 6 показаны

шесть графиков, интервал времени между которыми составляет десять минут.

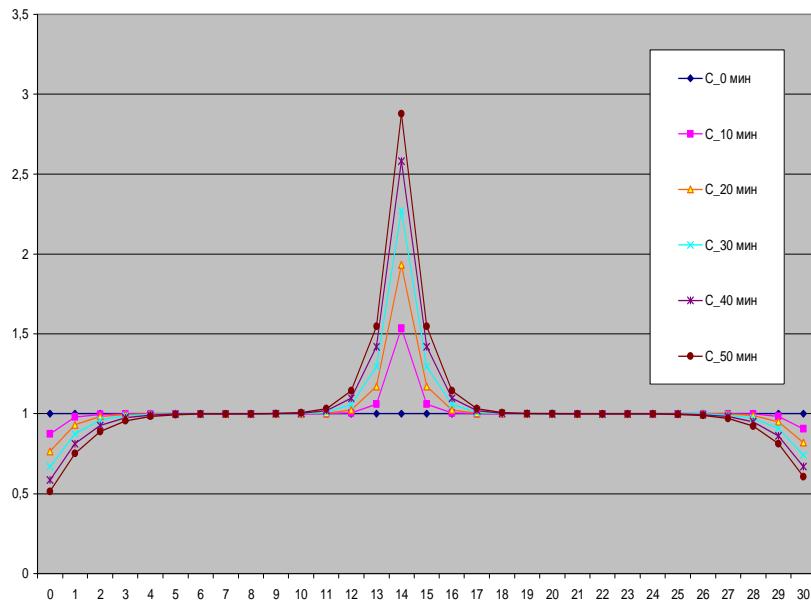


Рисунок 6 – Изменение концентрации атомов никеля по длине образца со временем в процессе растяжения в зоне свободного объема, возникающего в области разрыва

Также был сделан расчет для описания того, что скорость перемещения атомов Ni не одинакова по всей длине образца. Она постепенно увеличивается от краев к центру частицы. Процесс в центре частицы в данном случае рассчитывается для пяти точек:

$$\begin{aligned}
 0 \leq x < l/2 - \tau & \quad - c_i^{j+1} = \lambda c_{i+1}^j + (1 - 2\lambda - U)c_i^j + (\lambda + U)c_{i-1}^j; \\
 x = l/2 - \tau & \quad - c_i^{j+1} = (\lambda + 0,5U)c_{i+1}^j + (1 - 2\lambda - U)c_i^j + (\lambda + U)c_{i-1}^j; \\
 x = l/2 & \quad - c_i^{j+1} = (\lambda + U)c_{i+1}^j + (1 - 2\lambda - U)c_i^j + (\lambda + U)c_{i-1}^j; \\
 x = l/2 + \tau & \quad - c_i^{j+1} = (\lambda + U)c_{i+1}^j + (1 - 2\lambda - U)c_i^j + (\lambda + 0,5U)c_{i-1}^j; \\
 \tau + l/2 < x \leq l & \quad - c_i^{j+1} = (\lambda + U)c_{i+1}^j + (1 - 2\lambda - U)c_i^j + \lambda c_{i-1}^j.
 \end{aligned} \tag{5}$$

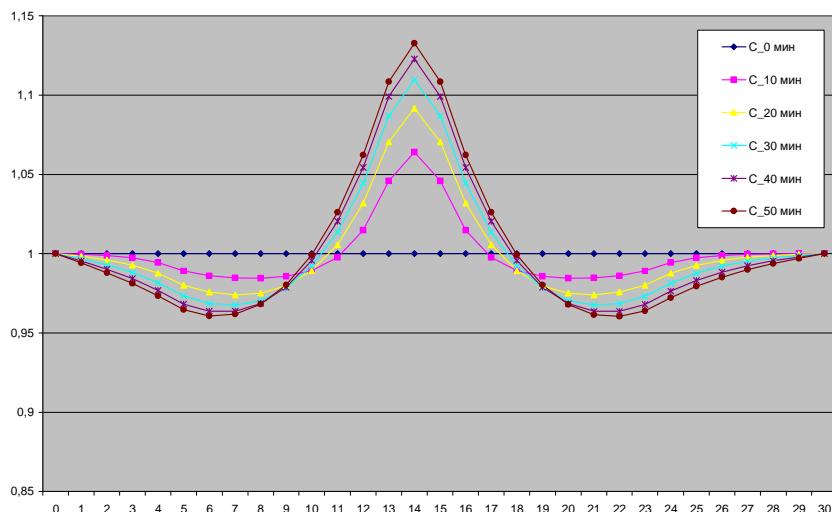


Рисунок 7 – Изменение концентрации атомов Ni по длине образца со временем

Известно, что направленная диффузия под действием механических нагрузок может носить краудионный характер [1, 5, 6]. Это хорошо согласуются с теорией сдвиговой трансформационной зоны, основанной на концепции возбужденных атомов и проиллюстрированной в экспериментальных и теоретических работах [7, 8, 9]. В последние годы появились теоретические работы [10, 11], в которых излагаются основы так называемой «супер-Арениусовской релаксации» в металлических стеклах. В модели предлагаются физические принципы перестройки групп атомов при низких температурах. Механизм, обеспечивающий такую перестройку, – это движение «сдвиговой трансформационной зоны». Область перегруппировки частиц на локальном уровне (мезоскопическом) названа сдвиговой трансформационной зоной. Внутреннее состояние сдвиговой трансформационной зоны характеризуется разницей величин ее плотности в начале и в конце зоны.

В концепции модели возбужденных атомов [12] считается, что пластический сдвиг вызывает переключение химической связи, т.е. механическое движение управляет химической реакцией, производя при этом сближение молекул. Это сближение обеспечивает переключение химических связей и энергию активации химических реакций, инициированных механическим ударом [13]. Такие процессы называются механохимическими.

Механическое нагружение может возбуждать реакционную способность. Нагрузка создает сдвиг, который приводит к переключению химических связей и изменяет симметрию кристаллической фазы. В работе [14] с помощью электронного микроскопа показано, что механизм трансформации обедненных атомами зон в тетраэдры дефектов упаковки заключается в образовании согласованных смещений тетраэдрических групп атомов в направлении {111} в область с избыточным свободным объемом.

Любой твердофазный процесс осуществляется благодаря диффузии, однако механизмы диффузии являются предметом острых дискуссий. Это происходит в основном из-за сложности проверки механизмов диффузии экспериментальным путем.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. В сплаве Ni_3Al после разрыва образца под действием растягивающей нагрузки методами магнитометрии и энергодисперсионного структурного анализа обнаружена ферромагнитная фаза в зоне разрыва.
2. На основании сравнения скорости диффузии, рассчитанной по методу разностных схем со скоростями диффузии, проходящей без динамической нагрузки, очевидно, что предложенный метод моделирования процесса направленной диффузии на качественном уровне описывает эксперимент

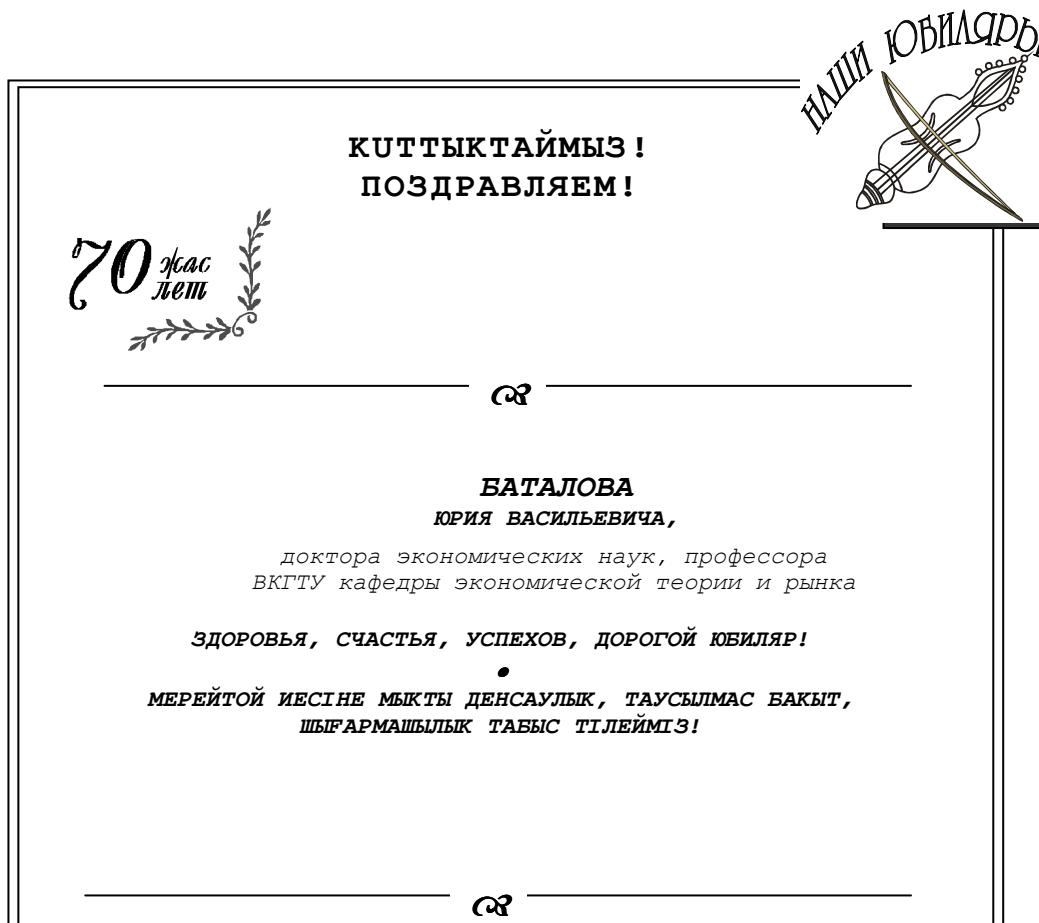
Авторы благодарят А.Б. Садибекова за помощь в проведении эксперимента.

Список литературы

1. Яшин А.В.Процессы атомной перестройки при динамическом растяжении / А.В. Яшин, Н.В.Синица, Е.А.Дудник, М.Д. Старостенков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - № 1. - 2008. - С. 16-20.
2. Бозорт Р. Ферромагнетиз. - ИИЛ. - М., 1956. - 784 с.
3. Полетаев Г.М. Ведущие механизмы самодиффузии в двумерных металлах / Г.М. Полетаев, М.Д. Старостенков, Ю.В.Пашева // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2004. - № 2. - С. 124-129.
4. Эббот М.Б. Гидравлика открытого потока. - Вычислительная гидравлика: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Wirth B.D., Bulatov V.V., Diaz de la Rubia T. Dislocation - stacking fault tetrahedron interactions in Cu // Journal of Engineering Materials and Technology. - 2002. - V.124., №3 - P. 329-334.
6. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. - М., 1978. - 383 с.

7. Kveglis L.I., Seredkin V.A., Kuzovnikov A.V., JETP Letters, Vol. 82, № 1, 2005, pp. 22-25.
8. Falk M.L., Langer J.S., Shear transformation zone theory elasto-plastic transition in amorphous solids // Phys. Rev. 1998, V. E57, P. 7192-7204.
9. Lemaitre A., Carlson J., Boundary lubrication with a glassy interface // Phys. Rev. E, 2004, 69, P. 061611(1-18).
10. Lemaitre A., Origin of a Repose Angle: Kinetics of Rearrangement for Granular Materials // Phys. Rev. Lett. 2002, V. 89, № 6, P. 064303(1-4).
11. Langer J.S., Lemaitre A., Dyinamic Model of Super-Arrhenius Relaxation in Glassy Materials // 2004, arXiv:cond-mat/0411038v1.
12. Сандитов Д.С. Физические свойства неупорядоченных структур / Д.С. Сандитов, Г.М.Бартенев. - Новосибирск: Наука, 1982. - 259 с.
13. Jonn J.Gilman Mechanochemistry/Science, v.274,1996,p.65.
14. Matsukava Y.,Zinkle S.J. Dynamic observation of the collapse process of a stacking faulttetrahedron by moving dislocations //Journal of nuclear materials - 2004, V. 329-333. - P. 919-923.

Получено 13.04.09



УДК 621.382.2

А.В. Градобоеv

Томский политехнический университет, г. Томск

М.К. Скаков, Д.М. Аубакирова

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ**

Арсенидгаллиевые сверхвысокочастотные (СВЧ) приборы, например светоизлучающие диоды (СИД), являются основой для изготовления устройств, эксплуатируемых в условиях космического пространства, в верхних слоях атмосферы и на ядерных энергетических установках [1-2]. И, как известно, при этом они подвергаются действию различных радиационных полей, что выдвигает определенные требования по обеспечению их радиационной стойкости [3-4]. Радиационное воздействие приводит к генерации стабильных радиационных дефектов, снижению концентрации электронов и уменьшению их подвижности, и, как следствие, к деградации параметров приборов [5-6]. Однако практически нет исследований по определению уровня бесштабной работы и времени потери работоспособности приборов при воздействии импульса лазерного излучения (ИЛИ). Поэтому целью настоящей работы является исследование влияния импульсного лазерного излучения на параметры светоизлучающих диодов.

В качестве объектов исследования в работе использовались СВЧ приборы и приборные структуры на основе GaAs, светоизлучающие диоды, изготавливаемые на основе AlGaAs. При выполнении работы использовался растровый электронный микроскоп японской фирмы «JEOL» (JSM – 6390LV) с приставкой EDS (энергодисперсионная) фирмы «OXFORD».

Изменения электрофизических свойств в пределах 10-50 % от исходного значения приводят к потере работоспособности большинства СВЧ приборов [7]. Изменение концентрации электронов в указанном диапазоне принято описывать либо через скорость удаления носителей, либо через коэффициент радиационного снижения концентрации электронов. Эти два коэффициента связаны друг с другом [8].

Введение радиационных дефектов также приводит к снижению подвижности электронов, увеличению сечения рассеяния за счет появления дополнительных центров рассеяния радиационного происхождения [9-10]. В данной работе нас интересует изменение подвижности электронов при комнатной температуре, поскольку эти условия являются нормальными при эксплуатации большинства приборов на основе GaAs.

Для прогнозирования изменений свойств приборов при облучении необходимо знать величины соответствующих коэффициентов, их зависимость от вида и энергии частиц, условий облучения и характеристик исходного GaAs.

ИЛИ является одним из радиационных факторов, воздействие которого на приборы может приводить к временной потере работоспособности, катастрофическим отказам и к деградации параметров приборов и устройств на их основе. Проблему исследования воз-

действия ИЛИ на различные приборы можно разделить на несколько характерных особенностей. Прежде всего, это воздействие ИЛИ на приборы в металлокерамических корпусах. В этом случае отсутствует прямое воздействие на активный элемент прибора, а стойкость прибора будет определяться стойкостью металлокерамического корпуса и влиянием теплового разогрева корпуса на активный элемент прибора. В случае СИД, изготавливаемых в открытом корпусе, ИЛИ воздействует непосредственно на активный элемент прибора, вызывая соответствующие деградационные процессы. Задачу исследования воздействия ИЛИ на приборы можно разделить на задачу исследования воздействия ИЛИ на металлокерамические корпуса приборов и на задачу исследования воздействия ИЛИ на активный элемент прибора.

При решении задачи исследования воздействия ИЛИ с различной длиной волны на активный элемент прибора (в нашем случае СИД) также можно выделить две характерные особенности. Прежде всего, это воздействие с длиной волны в окне прозрачности и воздействие ИЛИ с длиной волны вне окна прозрачности GaAs. В первом случае основная доля мощности ИЛИ будет поглощаться на контактах металл - полупроводник, а во втором случае основное поглощение энергии будет происходить в тонком приповерхностном слое полупроводника.

Настоящая работа посвящена определению порогового значения плотности энергии, начиная с которой обнаруживается деградация GaAs. Воздействие ИЛИ с длиной волны вне окна прозрачности приводит к тому, что вблизи поверхности формируется модифицированный слой, условия которого и являются предметом рассмотрения в настоящей работе.

Рассмотрим результаты исследования деградации GaAs при воздействии лазерного излучения с длиной волны вне окна прозрачности. Воздействие ИЛИ (0,308 мкм) осуществлялось на GaAs - подложку диодов, при этом площадь пучка лазерного излучения существенно превышала площадь подложки. Это позволяет в данном случае исключить из рассмотрения краевые эффекты, возникающие на границе «горячий» GaAs в зоне действия излучения – «холодный» GaAs вне зоны действия излучения.

Исследуемые диоды характеризовали интегральной мощностью оптического излучения, выводимого через подложку. Следует особо подчеркнуть, что с целью упрощения обработки экспериментальных данных во всех случаях мощность излучения диодов нормировалась на значение мощности до начала испытаний. Для оценки и контроля температуры активной области СИД в процессе воздействия лазерного излучения осуществлялся контроль прямого напряжения смещения при заданном рабочем токе. Это было необходимо для исключения дополнительной деградации мощности излучения диода вследствие повышения температуры его активной области в результате воздействия ИЛИ, т.к. нас интересует деградация мощности излучения, обусловленная появлением нестехиометрического слоя вблизи поверхности GaAs.

Для исследования нарушенных слоев GaAs, формируемых вблизи обрабатываемой поверхности вследствие воздействия ИЛИ, нами использовались следующие методики. Первая методика заключается в том, что для диода, подвергнутого действию лазерного излучения, измеряют мощность его излучения, удаляют часть нарушенного слоя в полирующим травителе на основе $H_2SO_4 + H_2O_2$ и повторяют измерение мощности излучения. Указанная процедура проводится циклически до тех пор, пока мы не обнаруживаем полного восстановления мощности излучения диода. Это свидетельствует о том, что нарушенный нестехиометрический слой модифицированного GaAs удален полностью. Данная методика

позволяет определять толщину нарушенного слоя с погрешностью 3-5 мкм.

Вторая методика определения толщины нарушенного слоя заключается в проведении измерений профиля распределения интенсивности микрокатодлюминесценции по сколу структуры, подвергнутой лазерному воздействию. Эти измерения проводились с помощью растрового электронного микроскопа, оборудованного специальной приставкой для измерения профиля интенсивности микрокатодлюминесценции. Разрешение по сколу в данном случае варьировалось от 0,8 мкм до 1 мкм.

Анализ результатов позволяет выдвинуть предположение о существовании двух механизмов деградации приповерхностного слоя GaAs в результате воздействия ИЛИ.

Воздействие ИЛИ в области 1 (рис. 1) приводит к разложению GaAs, которое сопровождается уходом мышьяка в окружающую атмосферу. При этом формируется приповерхностный нестехиометрический слой модифицированного GaAs, который содержит большое количество вакансий мышьяка и галлия в подрешетке мышьяка. Указанные выше дефекты являются центрами безызлучательной рекомбинации для собственного излучения активной области СИД, что подтверждается результатами исследования спектров излучения до и после воздействия ИЛИ. Введение этих центров безызлучательной рекомбинации в приповерхностном слое приводит к деградации мощности излучения диода. Таким образом, полученные зависимости мощности излучения диодов от плотности мощности лазерного излучения позволяют исследовать динамику деградационных процессов в приповерхностном слое GaAs.

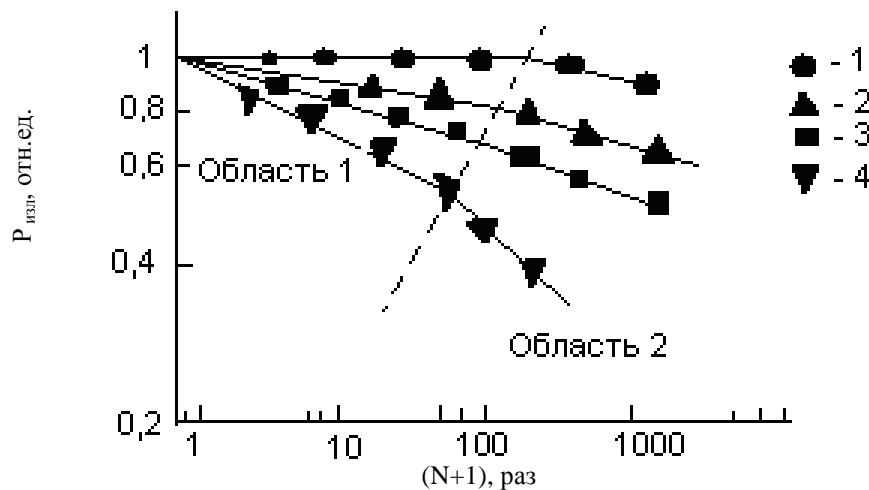


Рисунок 1 - Деградация мощности излучения СИД в зависимости от количества импульсов ИЛИ (0,308 мкм) с различной плотностью мощности: 1 – $1,25 \cdot 10^7$ Вт/см²; 2 – $2,5 \cdot 10^7$ Вт/см²; 3 – $6,7 \cdot 10^7$ Вт/см²; 4 – $2,5 \cdot 10^7$ Вт/см²

Зависимости, установленные для области 1 (рис. 1), позволяют определить пороговую плотность мощности ИЛИ, начиная с которой развиваются деградационные процессы в приповерхностном слое. На рис. 2 показана зависимость наклона кривых деградации мощности излучения СИД от плотности мощности ИЛИ для области 1 (рис. 1).

Эти результаты позволяют определить величину пороговой плотности лазерного излучения, равную $1 \cdot 10^7$ Вт/см². При плотности мощности меньше порогового значения разрушения поверхности GaAs не происходит даже при многократном воздей-

ствии ИЛИ (0,308 мкм).

Далее рассмотрим результаты исследования толщины нарушенных слоев, формируемых ИЛИ вблизи поверхности GaAs. Полное удаление нарушенного слоя приводит к полному восстановлению мощности излучения диода. Таким образом, используемая нами методика контроля мощности излучения диодов при контролируемом удалении нарушенного слоя химическим травлением позволяет установить как толщину нарушенного слоя, так и зависимость нарушенного слоя от энергетических характеристик лазерного излучения.

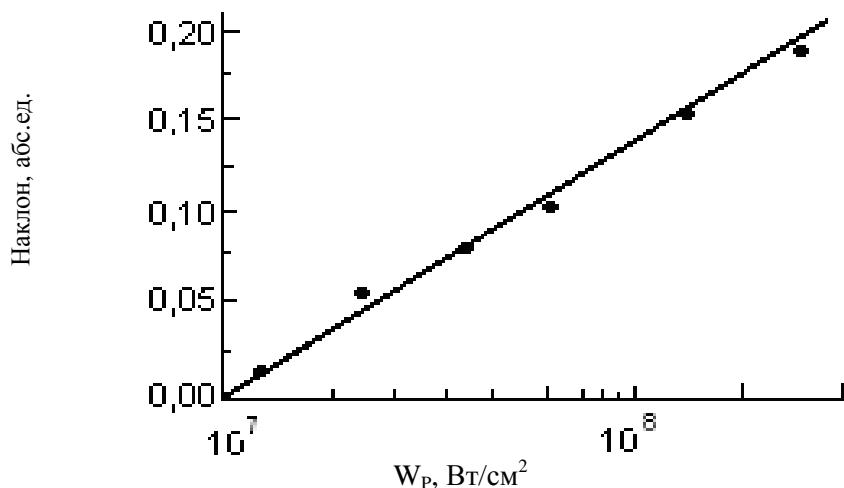


Рисунок 2 - Изменение наклона кривых деградации мощности излучения СИД ЗЛ107 в области 1 от плотности мощности ИЛИ (0,308 мкм)

Дальнейшее увеличение плотности мощности ИЛИ и/или количества воздействующих импульсов приводит к другому механизму деградации поверхности GaAs (область 2, рис. 1). В этой области работает один и тот же механизм деградации при различных плотностях мощности ИЛИ.

На рис. 3 представлена зависимость нормированного изменения мощности излучения СИД в области 2 от нормированного количества воздействующих импульсов для различных значений плотности мощности ИЛИ. В данном случае нормирование производилось на значения уровня деградации мощности излучения диодов и количество воздействующих импульсов лазерного излучения, начиная с которых работает второй механизм деградации (рис.1).

Начало проявления второго механизма деградации определялось как точка пересечения пунктирной линии на рис.1 с соответствующими деградационными зависимостями области 1. Таким образом определялся уровень деградации мощности излучения СИД и количество воздействующих импульсов, значения которых и использовались для нормирования результатов, полученных при большем количестве воздействующих импульсов.

Из рис. 3 видно, что деградация мощности излучения диодов в области 2 может быть описана одной и той же зависимостью, а это свидетельствует об идентичности механизма деградации в данной области при различных значениях плотности ИЛИ и различных значениях количества воздействующих импульсов.

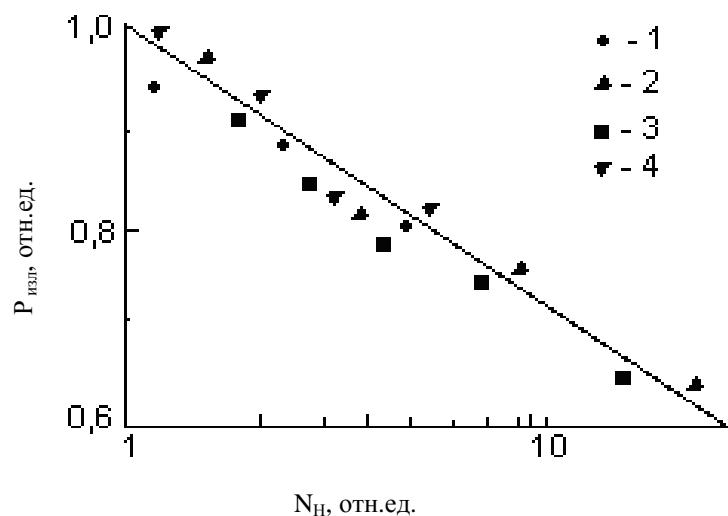


Рисунок 3 - Зависимость нормированного изменения мощности излучения СИД ЗЛ107 от нормированного количества действующих импульсов для различных значений плотности мощности ИЛИ (0,308 мкм): 1 - $1,25 \cdot 10^7$ Вт/см²; 2 - $2,5 \cdot 10^7$ Вт/см²; 3 - $6,7 \cdot 10^7$ Вт/см², 4 - $2,5 \cdot 10^7$ Вт/см²

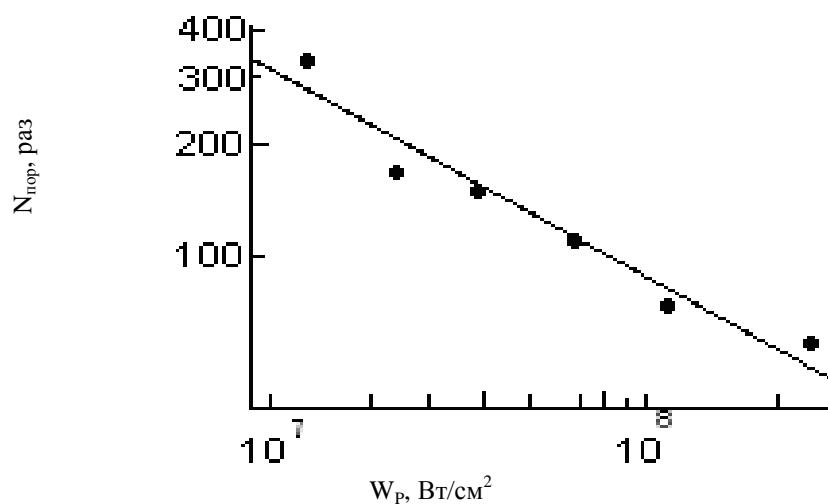


Рисунок 4 - Зависимость количества импульсов ИЛИ, при котором начинает проявляться второй механизм деградации от плотности мощности ИЛИ (0,308 мкм)

Далее определим условия воздействия ИЛИ, начиная с которых проявляется второй механизм деградации модифицированного слоя. На рис. 4 показана зависимость количества действующих импульсов, при котором начинает проявляться второй механизм деградации, от плотности мощности ИЛИ.

Электронно-микроскопические исследования показали, что вблизи границы начала проявления данного механизма деградации наблюдается появление галлия в отдельной фазе в виде капель. Дальнейшее повышение плотности приводит к росту размера капель. Появление отдельной металлической фазы галлия приводит к отражению излучаемого диодом света на металлических включениях, что соответственно приводит к деградации мощности излучения СИД.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

В результате проведенных исследований установлен факт механического разрушения корпусов при воздействии ИЛИ с длительностью импульса 10^{-3} с ($\lambda = 1,06$ мкм) для СВЧ приборов. Снижение механической прочности металлокерамических корпусов обнаруживается, уже начиная с плотности энергии 560 Дж/см², а при плотности энергии 800 Дж/см² наблюдаются разрушение корпуса и катастрофические отказы вследствие отпаивания кристалла.

При воздействии импульсного лазерного излучения с длиной волны в окне прозрачности GaAs, деградация параметров приборов определяется процессами поглощения энергии вблизи границы металл - полупроводник. При воздействии излучения с длиной волны вне окна прозрачности GaAs, деградация параметров приборов обусловлена термическим разложением GaAs с уходом мышьяка в окружающую атмосферу и обогащением тонкого приповерхностного слоя галлием, который при достижении определенной концентрации формирует отдельную металлическую фазу. Толщина нарушенного слоя слабо зависит от плотности энергии лазерного излучения.

Настоящая работа выполнена на основании договора о научно-техническом сотрудничестве между Восточно-Казахстанским государственным техническим университетом им. Д. Серикбаева и Томским политехническим университетом.

Список литературы

1. Градобоеев А.В. Радиационная стойкость СВЧ приборов на основе арсенида галлия / А.В. Градобоеев, А.П. Суржиков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – 277 с.
2. Градобоеев А.В. Изменение электрофизических характеристик арсенида галлия при облучении протонами различных энергий // Тр. XIV Межнац. совещ. «Радиационная физика твердого тела». – М., 2004. – 104 с.
3. Икома Т.И. Оценка качества эпитаксиальных слоев полупроводниковых соединений / Оё буцури. – 1982. – № 2. – Т.11. – С. 1226-1237.
4. Батавин В.В. Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев. – М.: Сов. радио, 1976. – 102 с.
5. Стриха В.И. Теоретические основы работы контакта металл – полупроводник. – Киев: Наукова думка, 1974. – 264 с.
6. Градобоеев А.В. Радиационные эффекты в арсениде галлия при облучении нейтронами и протонами / А.В. Градобоеев, А.П. Суржиков // Электронная промышленность. – 2002. – № 2/3. – С. 129-137.
7. Латышев А.В. О скорости удаления носителей в неоднородных кристаллах арсенида галлия / А.В. Латышев, В.Ф. Стельмак // В сб. Радиационные дефекты в полупроводниках. – Минск: БГУ, 1972. – С. 268-269.
8. Кольченко Т.И. Электрические свойства арсенида галлия, облученного электронами и нейтронами / Т.И. Кольченко, В.М. Ломако // ФТП – 1975. – № 9. – Т.9. – С. 1757 – 1760.
9. Градобоеев А.В. Стойкость арсенида галлия при облучении электронами / А.В. Градобоеев, А.П. Суржиков // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC – 2003). – 9-12 июня 2003 г. – М., 2003.
10. Градобоеев А.В. Действие импульсного лазерного излучения на светоизлучающие диоды // Радиационная физика: Тр. Междунар. науч. конф. (Бишкек – Каракол, 20-27 июля 2003). – Бишкек: Илим, 2003. – 105 с.

Получено 04.05.09

УДК 551.24+ 552.3 (481)

Б. А. Дьячков

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

С. Е. Селифонов

ТОО «Геоинцентр», г. Алматы

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И СТРОЕНИЯ РИФТА ОСЛО В НОРВЕГИИ

В прошедшем году большим событием для геологов всего мира явился Международный геологический конгресс (МГК-33), который состоялся в Норвегии, г. Осло (6-14 августа, 2008). Геологические конгрессы традиционно созываются через каждые четыре года Международным Союзом геологических наук (МСГН) и проходят в разных странах. Организаторами данного 33-го конгресса были Скандинавские страны: Норвегия, Швеция, Дания, Финляндия и Исландия. В работе конгресса приняли участие более 6 000 ученых и специалистов-геологов практически из всех стран мира.

Национальный комитет геологов Казахстана сегодня является одним из активных и признанных членов МСГН, последовательно и достойно представляющий свою страну и казахстанскую геологию на международной арене. Из Казахстана на МГК-33 прибыла крупная по численности делегация из 82 человек. В её составе: работники Комитета геологии и недропользования, известные ученые, преподаватели университетов, специалисты геологических организаций, предприятий и компаний. От Восточного Казахстана были участники территориального управления «Востказнедра», ТОО ГРК «Топаз» и ВКГТУ им. Д. Серикбаева. Общие сведения о работе конгресса рассмотрены ранее [1].



Рисунок 1 – Руководители геологической экскурсии
Б. Ларсен и С. Олаусен (справа)

Во время конгресса авторы данной статьи приняли участие в интересной геологической экскурсии в районе города Осло, в которой ознакомились с уникальной геологической структурой под названием «Ослорифт». Руководителями экскурсии были ведущие норвежские геологи, ученые из университетов Осло и Бергена – Бьёрн Ларсен и Снор Олаусен (рис. 1).

В экскурсии приняли участие геологи из США, Франции, Англии, Китая, России, Казахстана и других стран, всего 25 человек. Она проводилась на комфортабельном катере

«Нордсол» вдоль побережья залива Ослофиорд Северного моря (севернее пролива Скагеррак) с остановками для осмотра типовых геологических обнажений. Направление

маршрута экскурсий показано на рис. 2. В основе статьи использованы опубликованные материалы конгресса, путеводители экскурсии [2-4] и личные наши наблюдения.

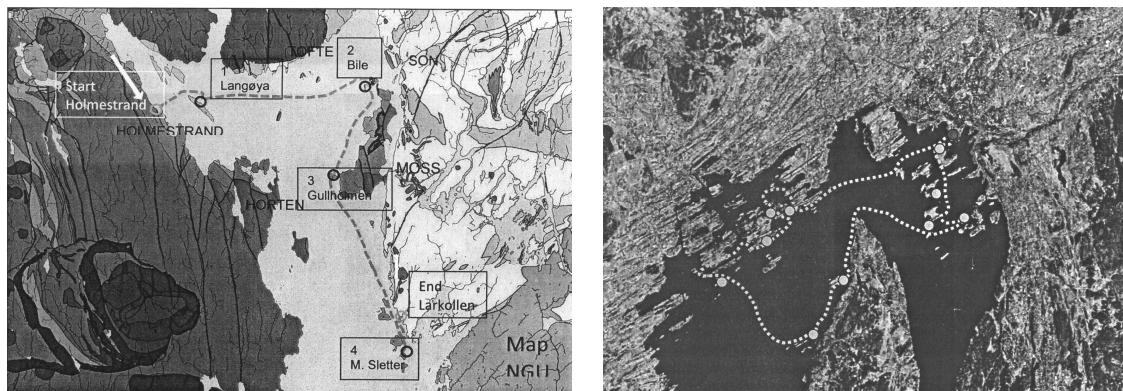


Рисунок 2 - Направление маршрута и места остановок геологической экскурсии в Ослофьорде [3, 4]

Рифт Осло является самой северной частью системы пермского бассейна Ротлигенс в Европе. Образовался в процессе раздвига литосферной плиты, расположенной к северу от системы разломов Торнквист, имеет тектоническую и пространственную связь с последней фазой герцинского тектогенеза. Образование основного грабена в районе Осло началось в конце каменноугольного периода, а завершилось через 20-30 Ma, сопровождаясь интенсивным вулканализмом и рифтообразованием с последующим поднятием и внедрением крупных батолитовых интрузий в пермское время. Процесс завершился образованием малых гранитных интрузий и даек в раннем триасе, приблизительно 65 Ma после начала рифтообразования.

Архитектура рифта Осло очень похожа на другие хорошо известные рифтовые структуры. Рассматриваемый рифт подразделяется на четыре сегмента (грабена), которые разделяются разломами и имеют смещение полярности по всей длине оси рифта. Соответственно с северо-востока на юго-запад выделяются грабены Рендален, Акершус, Вестфолд и Скагеррак. Два сегмента грабена Акершус и Вестфолд формируют классический грабен Осло, длина которого составляет 220 км, ширина – около 60 км. Общая длина рифта Осло, ориентированного в северо-восточном направлении, составляет порядка 500 км (рис. 3).

Ларсен и Сандвол (1984) считают, что рифт Осло, сформированный в каменноугольный и пермский периоды, представляет континентальную систему рифтов с интенсивным вулканализмом и имеет многие общие черты с рифтами Восточной Африки в Кении и Эфиопии. Большой объем вулканического материала является общей чертой для вышеуказанных систем, что отличает их от других континентальных рифтов со слабым вулканализмом (рифт Байкал и грабен Викинг). Для сравнения на территории Большого Алтая континентальный рифтогенез проявился в более позднее время в связи с мезозойской тектономагматической активизацией и локальным очаговым вулканализмом трапповой и трахибазальт-андезит-трахириолитовой субщелочной формации (луговской, семейтауский комплексы) [5].

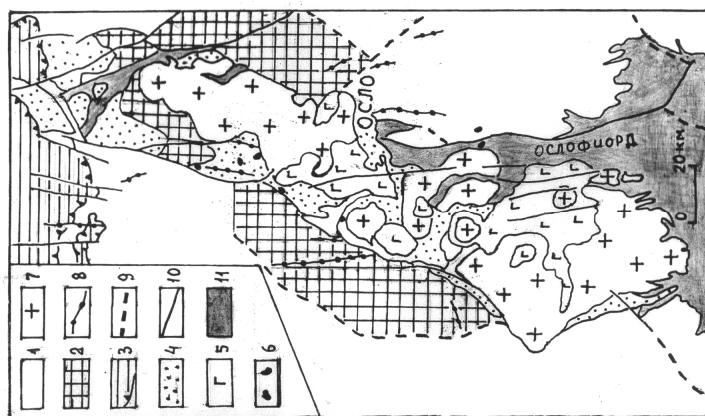


Рисунок 3 - Схематическая геологическая карта рифта Осло: 1 – докембрийское основание Фенноскандинавской плиты за пределами рифта и 2 – в контуре рифта; 3 – каледонский структурный этаж; 4 – кембро-силурийские осадочные отложения; 5 – вулканогенно-осадочные породы карбона и перми; 6 – габброидные интрузии; 7 – гранитоидные батолиты пермского возраста; 8 – поздние дайки диабазов и порфиров; 9 – глубинные разломы, ограничивающие Рифт Осло; 10 – разрывные нарушения внутриблоковые; 11 – водное пространство Ослофьорда. Составлена по материалам [3, 4]

По Ньюмену (2004) основным источником базальтовой магмы в рифте Осло была литосферная мантия, в которой образовались магматические очаги вблизи границы Мохонии на глубине 36 км. Поднимающиеся магматические расплавы базальта испытывали контаминацию в нижних слоях земной коры и способствовали анатектоническому плавлению вмещающих пород докембрийского возраста. Позднее в возрасте 280-275 Ma доминирующее значение приобрели сиенитовые и гранитовые магмы, а мантийные источники фиксируются базальтами в вулканитах центрального типа и своеобразными породами – ларвикитами и ромбер-порфировыми лавами.

По представлениям норвежских геологов развитие рифта Осло происходило в шесть этапов [2]. В процессе геологической экскурсии нами были осмотрены и сфотографированы некоторые типовые обнажения горных пород, характеризующие особенности геологического строения рифта Осло. Предшествующими для рифтообразования были геологические структуры докембрийского и каледонского фундамента, широко развитые в Фенноскандинавии. В процессе образования рифта эти структуры подверглись дроблению и раздвигу в зоне глубинного разлома северо-восточного направления с новообразованием более поздних герцинских структур.

Докембрийские образования на современном эрозионном срезе фрагментарно фиксируются в бортах Ослофьорда. Они представлены конгломератами, кристаллическими сланцами, кварцитами, амфиболитами, метагабброидами, гранито-гнейсами и другими метаморфитами. Породы интенсивно раздроблены и трещиноваты, часто содержат прожилки метаморфогенного кварца и гнезда сульфидных минералов.

Каледонский структурный этаж несогласно залегает на кристаллических сланцах докембрия. Осадочные отложения нижнего палеозоя образовались в кембрийский, ордовикский и силурский периоды в течение 120 млн лет. Кембрийские отложения представлены алевролитами, песчаниками, известняками и черными сланцами. Богатые органикой сланцы характеризуются повышенной радиоактивностью и содержат самородную серу.

К ордовику относятся мелководные отложения, образовавшиеся в условиях шельфа.

Это конгломераты, массивные песчаники, кремнисто-обломочные породы, органогенные известняки и граптолитовые сланцы, которые обнажаются в береговой линии фиорда (рис. 4). Возраст пород определяется по фаунистическим данным (строматопороиды и кораллы в рифовых постройках). Полезные ископаемые представлены эвапоритами (солями), образовавшимися в субтропическом климате.



Рисунок 4 - Граница карбонатно-терригенных отложений ордовика (справа) и карбонатной толщи силура с полосчатым рисунком

Силурские отложения, залегающие согласно на ордовике, представлены пачками переслаивания песчаников и алевролитов, а также органогенными известняками с обильной фауной кораллов (табуляты, ругозы, кринондеи) брахиопод и строматопороидей (рис. 5). Карбонатные породы местами характеризуются ритмично-слоистой текстурой, которая подчеркивается параллельными слоями светлых известняков (мощность 5-10 см) на фоне основной темно-серой массы. По этим признакам силурийские породы хорошо отличаются от массивных темно-серых песчаников ордовика (рис. 4). Рассмотренные кемброСилурийские осадочные отложения в стадию коллизии подверглись складчато-разрывным деформациям, сплющены, имеют пологое или крутое залегание, часто с тонкоплитчатой отдельностью (рис. 6).



Рисунок 5 - Скопление фауны в известняках силурского возраста

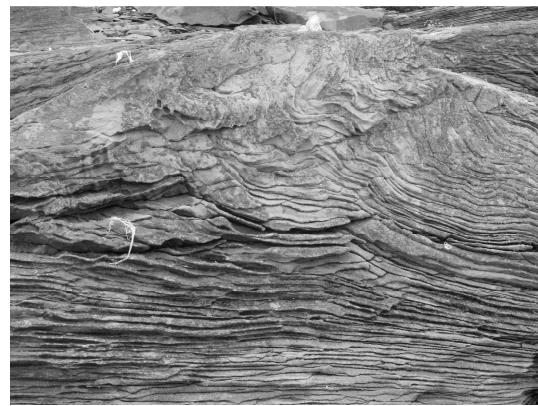


Рисунок 6 - Тектонически нарушенные осадочные породы с мелкими флексуральными складка-

ми и тонкоплитчатой отдельностью

В герцинский цикл восстанавливается дальнейшая геологическая история развития Осло региона. Начало рифтообразования происходило в позднекаменноугольный период с отложениями тонкого слоя осадочных пород, представленных формациями Колсас и Танум. Формация Колсас несогласно залегает на складчатой толще кембрия-силура. В ней преобладают красные аргиллиты и песчаники, подчиненное значение имеют конгломераты, известняки и редко ангидриды. По условиям образования это пойменные и аллювиальные отложения речного русла и мелководные озерные осадки. Формация Танум представлена кварцевыми конгломератами, галечниками и средне- и крупнозернистыми песчаниками; менее распространены аргиллиты темно-серого цвета, богатые растениями и повышенной углистости. Отмечаются также мелкозернистые известняки и пласты угля. Возраст отложений по фораминиферам и флоре соответствует башкирскому и московскому ярусам. По этим признакам отложения формаций Колсас и Танум можно сопоставить с молассовой лимнической угленосной формацией Западной Калбы (буконьская свита C₂₋₃) [5]. Магматическая деятельность проявилась в виде маломощных пластовых интрузий сиенитового и камптонитового состава (Зиеглер, 2006). По возрасту они отнесены к позднему карбону (308-305 Ma).

Начало рифтообразования фиксируется потоками базальтовой лавы и вулканокластических образований мощностью до 20 м (формация Скаугум). Состав базальтов очень разнообразен: от сильно недонасыщенных кремнеземом мелилитов до перенасыщенных кварцевых толеитов. Встречаются также щелочные оливиновые базальты, связанные с мантийными источниками. Они образуют тонкие сложные лавы волнистой текстуры столбчатой отдельности, разделенные иногда вулканокластическими осадками (пески и конгломераты). В центральной части Рифта Осло проявлены аллювиальные обломочные потоки красного цвета, содержащие вулканокластический материал с обломками песчаников и крупнозернистых конгломератов.

Следующий этап рифтообразования сопровождается интенсивной вулканической деятельностью, охватывающей большую часть Ослофиорда. Наиболее ранние ромбен-порфировые лавы первого потока имели максимальную мощность 100 м и занили площадь порядка 10 000 км². В настоящее время наиболее крупные выходы базальтовых лав представлены двумя платами: Кроскоген (около 400 км²) и Вестфолд (более 1000 км²). В последнем стратиграфическая мощность разреза составляет около 3 км, где ромбен-порфиры занимают 75 %. Здесь в течение примерно 10 млн лет изверглось 50 потоков с интервалом 250 тыс. лет. Базальтовые лавы спокойно изливались на больших территориях в «гавайском» стиле и почти не сопровождались каким-либо пирокластическими продуктами; вероятно они имели относительно низкую вязкость.

Ромбен-порфиры имели средний состав SiO₂ 55 % с относительно высоким содержанием Na и K. Фенокристаллы полевого шпата (размером больше 1 см) составляют 5-30 % от объема пород. Эти базальты также щелочные оливиновые, но встречаются недонасыщенные базаниты. За пределами базальтовых плато на всей территории локализовались крупные ромбен-порфировые дайки трещинного типа. Выше потоков лав расположены грубообломочные разноцветные конгломераты, содержащие обломки силурийских песчаников, гальку кварца, крупные глыбы ромбен-порфировых лав и другие породы (рис. 7).

Окончание рассматриваемого типа тектоно-магматической деятельности ознаменовалось внедрением основных ларvikитовых интрузий. Ларvikиты – это национальная горная порода Норвегии, которая имеет прекрасные эстетические свойства, хорошо поддает-

ся обработке и отправляется на экспорт. По составу является разновидностью крупно-кристаллического лабрадорита темно-серой, почти черной окраски. Главная декоративная особенность ларвикита заключается в иризации в нем кристаллов плагиоклаза в различных оттенках голубого цвета, поэтому образцы светло-голубой, голубой и серебристой окраски и имеют названия «голубая жемчужина», «морская жемчужина» и другие. Эти камни используются для поделочных и облицовочных целей. Изделия из ларвикита демонстрировались в выставочном зале Норвегии во время работы конгресса.



Рисунок 7 - Грубообломочные конгломераты пермского возраста с реликтовой слоистостью

В пермское время развитие рифта продолжалось с извержением базальтовых лав в вулканах центрального типа, приуроченных к разломам. Вулканическая деятельность проявилась в несколько ослабленном виде, по составу преобладали щелочные оливиновые базальты с небольшими вариациями. Цепочки вулканитов локализовались вдоль центральной оси грабена Вестфолд, к северо-западу от Драммена (Рамберг и Ларсен, 1978). Первоначальный диаметр кальдер вулканов в основании составлял порядка 36×18 км. По аналогии с Восточно-Африканским рифтом высота центральных вулканов в Рифте Осло оценивается в 1-1,5 км выше дна долины рифта.

В наиболее крупных центральных вулканах в процессе дифференциации базальтовой магмы выкристаллизовались щелочные разности трахитового и риолитового состава. Формирование кальдер сопровождалось взрывной деятельностью с образованием щелочных игнимбритов и формированием кислых кольцевых даек. Возраст трахитовых игнимбритов внутри Вестфолда был определен в 288-285 Ma (Сандвол и Ларсен, 1990), а кольцевые дайки и центральные интрузии в Кроскогене сформировались в 270 Ma, т. е. значительно позже взрывов кальдер в Вестфолде.

Самые молодые осадочные породы, сохранившиеся внутри кальдер рифта – красные брекции, песчаники и тонкие слоистые аргиллиты, часто ассоциируемые с пирокластическими породами. Для них характерно аллювиальное и озерное происхождение, наиболее хорошо они сохранились внутри кальдеры Нитетад (Натерстад, 1978).

После проявления вулканической деятельности в период времени 265-255 Ma на территориях Вестфолда, Нордмарка и Хурдал (к северу от Осло) внедрились крупные батолитовые интрузии щелочных сиенитов (нордмаркитов) и щелочных гранитов (экеритов). Эти магматические образования в определенной степени можно сопоставить с щелочны-

ми гранитоидами преображенского (P_2) и керегетас-эспинского (P_2-T_1) интрузивных комплексов Большого Алтая [5]. Формирование рифта завершилось внедрением комплекса малых гранитных интрузий возраста 250-245 Ma, расположенных к северу от города Осло (Сандвогл, 1990). Самыми молодыми являются дайки диабазов и кислых порфиров постколлизионной активизации, занимающих поперечное направление относительно северо-восточных геологических структур рифта Осло. Дайки имеют четкие и резкие контакты с вмещающими осадочными породами, правильно-плитообразную форму, мощность варьирует от десятков сантиметров до первых метров (рис. 8). По вещественному составу и геотектонической позиции они близки к поздним дайковым комплексам Калбы-Нарымской зоны и Жарма-Саура (миролюбовский и бугазский комплексы, P_2-T_1).



Рисунок 8 - Поздняя поперечная дайка диабазов (в центре),
рассекающая осадочные породы ордовика

Таким образом, во время проведения Международного геологического конгресса в Норвегии мы ознакомились с уникальной геологической структурой «Ослорифт», сформированной в процессе континентального рифтогенеза Фенноскандинавской литосферной плиты в позднекаменноугольный и пермский периоды. Образование данной структуры сопровождалось интенсивной магматической деятельностью ритмично-пульсационной направленности с резким преобладанием на ранних этапах развития рифта базальтоидного вулканизма, а на поздних – внедрением крупных гранитоидных интрузий щелочного состава и формированием системы молодых поперечных даек. Интересными породами представляются ромбен-порфиры щелочных оливиновых базальтов с крупными фенокристаллами полевых шпатов и интрузивные ларвикиты с декоративными свойствами, которые используются в качестве поделочного и облицовочного камня Норвегии. При анализе материалов выявляются некоторые черты сходства направленного развития геологических образований Рифта Осло Норвегии и Большого Алтая Восточного Казахстана. По мнению норвежских геологов, несмотря на многолетние исследования рассматриваемого рифта (около 200 лет), здесь еще много нерешенных вопросов, требующих новых исследований.

Список литературы

1. Дьячков Б. А. Международный геологический конгресс в Норвегии // За знание. Газета

- Вост.-Каз. госуд. техн. университета. - № 9, 2008. - С.8.
- 2. Larsen B.T., Olaussen S., Sundvoll B. and Heeremans M. The Permo-Carboniferous Oslo Rift through six stages and 65 million years // Episodes. International Union of Geological Sciences. March 2008. - Vol. 31, №1. - P. 52-58.
 - 3. Larsen B.T. and Olaussen S. The Palaeozoic geology of the Oslo Region/The Outer Oslofjord area. 33 IGC excursion №25 A, August 8th, 2008. - 45 p.
 - 4. Bockelie F., Larsen B.T., Olaussen S. The Palaeozoic geology of the Oslo Region, the Inne Oslofjord area. 33 IGC excursion №25 B, August 12, 2008. - 34 p.
 - 5. Большой Алтай: (геология и металлогения). - В 3 кн. - Кн. 1.: Геологическое строение / Г.Н. Щерба, Б.А. Дьячков, Н.И. Стучевский и др. - Алматы: Фылым, 1998. - 304 с.

Получено 13.04.09

УДК 553.2 (574.4)

Б.А. Дьячков, М.А. Мизерная

ВКГТУ им Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

Н.П. Майорова

ТОО «Алтайский геолого-экологический институт», г. Усть-Каменогорск

**МЕТАЛЛОГЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА
В СИСТЕМЕ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА**

Рассматриваемая территория охватывает геологические структуры Рудного Алтая, Калбы и Жарма-Саура, входящие в состав Большого Алтая (БА). К бортовым структурам относятся Горный Алтай (на северо-востоке) и Чингиз-Тарбагатай (на юго-западе.) В региональном плане БА размещается в Северо-Западной Азии и входит в состав Центрально-Азиатского металлогенического пояса. По районированию подразделяется на два крупных субрегиона: 1) Юго-Западный Алтай - Синьцзян, сформированный в активной окраине Сибирской платформы, и 2) Жарма-Саур-Баганур, образовавшийся в борту Казахстанского микроконтинента. С позиций мобилизма эти структуры испытали длительное и сложное геологическое развитие от докембрая до киммерийского и альпийского циклов включительно, а в современном виде они разделяются Зайсанской сутурной зоной [1].

Большой Алтай - это крупный центр цветной и золотодобывающей промышленности Казахстана. Здесь сосредоточены крупные месторождения Cu, Pb, Zn, Au, Ag и других металлов. Главные месторождения размещаются в четырёх рудных поясах. Исследования последних лет и анализ материалов по смежной территории БА позволяют уточнить некоторые элементы районирования, влияющие на практику прогнозно-поисковых работ.

Рудноалтайский медно-полиметаллический пояс объединяет промышленные месторождения, сформированные в борту континентальной окраины Горного Алтая в рифтогенной и островодужной обстановках (D_1e - D_3fm_1). Месторождения характеризуются богатыми комплексными рудами (Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Pt и др.), генетически связанными с группой базальт-андезит-риолитовых формаций, дифференцированных и контрастного ряда, образующих несколько рудоносных стратоуровней от D_1e до D_3fm_1 [2-4]. Модель рудообразования отражает генетическую связь медно-полиметаллических месторождений с девонским вулканализмом, многостадийность рудного процесса и многоэтажность распределения оруденения в рудных зонах, рудных узлах и полях (с вертикальным размахом руд до 1000-15000 м). Наиболее рудоносными являются вулканогенно-рудные центры кольцевого строения, вулканокупола, синвулканические разломы, узлы пересечения дизьюнктивов разных направлений, горизонты углисто-глинистых и известковистых

сланцев и другие. Важнейшие рудные районы: Лениногорский (месторождения Риддер-Сокольное, Тишинское, Шубинское, Чекмарь и др.), Зыряновский (Зыряновское, Малеевское, Греховское и др.) и Прииртышский (Орловское, Николаевское, Артемьевское, Белоусовское и др.). Имеются перспективы открытия новых месторождений.

Основные рудные зоны (Лениногорская, Тишинская, Зыряновская, Орловско-Белоусовская и др.) и медноколчеданные и колчеданно-полиметаллические месторождения размещаются в стержневой части Рудного Алтая – в Рудноалтайско-Ашалинской металлогенической зоне, ограниченной Белоубинско-Маркакульским и Иртыш-Марка-кульским глубинными разломами, которые фиксируются линейными поясами габбро-диабазовых интрузий. На юго-восточном фланге Рудного Алтая отмечается резкое сужение структурно-формационных и металлогенических зон, связанное с тектоническим сжатием в процессе коллизии Джунгарской и Сибирской плит. Возникшие здесь структуры сопряжения, сходящиеся в единый виргационный пучок юго-восточнее оз. Маркаколь, отличаются сложным геодинамическим развитием, интенсивным проявлением магматизма и метаморфизма, многопрофильным оруденением (Fe, Cu, Ni, Zn, Pb, Au, W, Mo и др.).

В процессе работы казахстанско-китайской геологической экспедиции (1989-1993 гг.) установлено продолжение Рудноалтайского медно-полиметаллического пояса в пределы территории Китая на расстояние более 250 км, а также пространственное смыкание Иртышской и Северо-Восточной зон смятия, ограничивших Рудноалтайско-Ашалинскую металлогеническую зону. Произведена корреляция медно-полиметаллического пояса Рудного Алтая и Синьцзянского Алтая, основные выводы опубликованы в монографии [2]. Важным доказательством единства рудоносных структур на приграничной территории является обнаружение в Китае медноколчеданного месторождения Ашалы, близкого к объектам рудноалтайского типа, и золоторудного месторождения Долоносай, расположенного на юго-восточном продолжении рудного поля Манка (рис. 1). Особенности их геологического строения приводятся по данным китайских геологов [2, 11].

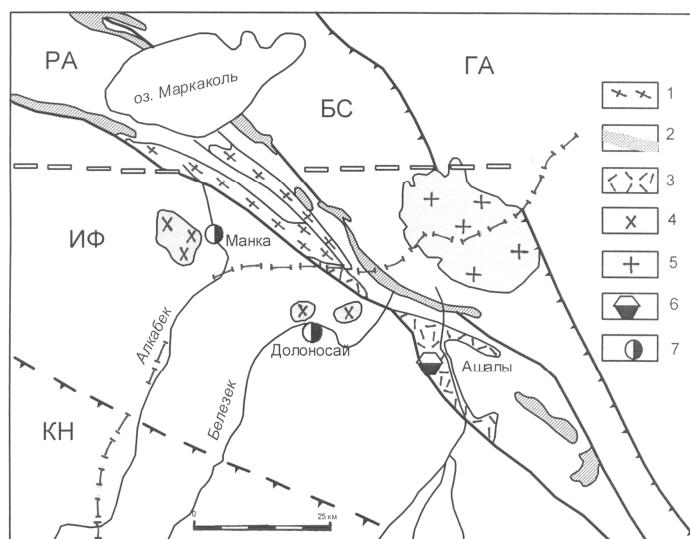


Рисунок 1 - Металлогеническое районирование приграничной территории Рудного Алтая и Синьцзянского Алтая: 1-5 – геологические формации (1 – амфиболит-гнейсовая $PR_1?$, 2 – базальто-риолитовая кремнисто-терригенная D_{2-3} , 3 – габбро-диабазовая D_3 , плагиогранит-гранодиоритовая

C_3 , 5 – гранитоидная Р₁); 6, 7 – рудные формации (6 – колчеданная медно-цинковая, 7 – золото-кварцевая). Районирование: ГА – Горный Алтай, БС – Белоубинско-Сарымсактинская, РА – Рудноалтайско-Ашалинская, ИФ – Иртыш-Фуюнская металлогенические зоны, КН – Калба-Нарымский рудный пояс. (Другие условные обозначения см. на рис. 2. Использована работа [2])

Месторождение *Ашалы* находится в 30 км от казахстанско-китайской границы, непосредственно на продолжении Теректинско-Александровской рудоносной зоны Южного Алтая. Рудовмещающие вулканогенно-осадочные отложения ашалинской свиты (D₁₋₂) представлены переслаиванием дакитов и их туфов, туфогравелитов, туфопесчаников с глинисто-кремнистыми алевролитами и туффитами. Эти отложения вместе с рудными телами смыты в синклинальную складку. Размеры основных рудных тел значительные: длина более 500 м, мощность варьирует от 2,8 до 10 м, достигает в раздувах 200 м, по падению они прослежены до глубины 300-800 м. По составу руды в основном колчеданно-медно-цинковые, массивной и вкрапленной текстуры. В верхней части зональной рудной колонны развиты барит-полиметаллические руды. Главные рудные минералы – пирит, халькопирит, к второстепенным относятся сфалерит, галенит, блеклая руда, халькоzin и другие. По запасам месторождение крупное, промышленное значение имеют Cu, Zn, Pb, Au и другие компоненты .

По геологическим условиям формирования и вещественному составу руд, связанных с девонским вулканизмом, рассматриваемое месторождение имеет многие черты сходства с медно-колчеданными месторождениями Прииртышского рудного района (Орловское, Николаевское). Эти данные повышают перспективность Теректинско-Александровской зоны, прогнозная оценка которой произведена Н.В. Полянским и О.П. Евтушенко (2008 г.).

Месторождение *Долонсай* также расположено на китайской территории, в 10 км южнее пос. Алексеевка. Пространственно приурочено к Иртыш-Фуюнской металлогенической зоне. Рудовмещающими являются карбонатно-терригенные отложения токсарыкской свиты (D₁₋₂), сложенные известково-глинистыми, глинисто-кремнистыми алевролитами, песчаниками и органогенными известняками. Интрузивные породы представлены массивами биотитовых тоналитов, гранодиоритов и кварцевых диоритов и связанных с ними дайками диоритовых порфиритов, гранит-порфиров и кварцевых жил (C₂₋₃). Рудо-контролирующее значение имеет зона дробления и повышенного рассланцевания субмеридионального направления, сформированная на контакте известняков и терригенных пород. В этой зоне локализовались золотоносные дайки среднего и кислого состава и золоторудные кварцевые жилы. Общая протяженность рудоносной зоны 15 км при мощности до 200 м. В ее пределах выделяется несколько рудных тел сложной морфологии, сложенных кварцевыми жилами и штокверками, метасоматически измененными алевролитами и песчаниками. Протяженность рудных тел изменяется от 100 до 800 м при мощности от 0,3 до 14 м. Падение их на запад под углами 55-80°, на глубину они прослежены скважинами на 300 м и более. Рудные минералы – пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, золото и др. Среднее содержание золота в рудных телах варьирует от 4 до 23 г/т, составляя в зоне окисления 5 г/т. Преобладает свободное золото с размером частиц 0,02-0,05 мм. Месторождение разрабатывается.

При анализе геологического строения выявляется близость рассматриваемого объекта с золоторудным месторождением Манка по структурной позиции, сходной рудовмещающей формации девонского возраста, генетической связи золота с малыми интрузиями и дайками диорит-гранодиоритового состава (аналоги кунушского комплекса), вещественному составу руд и другим признакам. Это позволяет выделить на приграничной

территории единое рудное поле Манка-Долоносай, в пределах которого рекомендуется проведение детальных прогнозно-металлогенических работ на современном научно-техническом уровне [5, 6].

Калба-Нарымский пояс - это главная редкometалльная структура региона, ограниченная глубинными разломами и вытянутая в северо-западном направлении более чем на 500 км при ширине 20-50 км. По геолого-геофизическим данным Калба-Нарымская зона сформировалась в коре континентального типа и резко отличается от соседних структур по геологическому строению, составу земной коры и металлогенезу. Предполагается, что это осколок погруженной докембрийской плиты (террейн), причленившейся к Большому Алтаю в стадию герцинской коллизии [3]. В позднюю орогенную стадию здесь сформировался крупный Калба-Нарымский пояс гранитоидов пермского возраста, сопровождающийся многими месторождениями и рудопроявлениями пегматитового, альбитит-гнейснового, гнейсово-кварцевожильного и других рудноинформационных типов. Редкometалльные объекты формируются в четырех рудных районах (Шульбинский, Северо-Западно-Калбинский, Центрально - Калбинский и Нарымский), двух рудных зонах (Гремячинско-Киинская, Карагойн-Сарыозекская) и 22 рудных узлах.

Основным источником редких металлов (Ta, Nb, Be, Li, Cs, Sn) являются гранитные пегматиты. Модель образования редкometалльных пегматитовых определяется их генетической связью с гранитами калбинского комплекса (P_1) при ритмично-пульсационном поступлении рудоносных растворов (H_2O , F, B, Cl, Ta, Sn и др.) из внутrikамерного очага гранитных расплавов, в условиях открытой или полузамкнутой магматической системы [7].

Пегматиты содержат уникальные минералы: клевеландит, цветные и полихромные турмалины, сподумен, лепидолит, танталит и др. Известные пегматитовые месторождения разрабатывались (Бакенное, Юбилейное, Белая Гора и др.). Актуальной задачей является укрепление минерально-сырьевой базы для редкometалльного производства.

По новым мобилистским представлениям развития геологических структур Большого Алтая и анализу карты глубинного строения Калбы и Жарма-Саура (В.Н. Любецкий, Г.Н. Нахтигаль) предполагается резкое расширение северо-западного фланга Калба-Нарымского пояса (до 80-100 км) в виде дугообразного подворота меридионального простирания (рис. 2). Это согласуется с направлением Зайсанской сутурной зоны и Чарско-Горностаевского оливинитового пояса, что дополнительно свидетельствует о сложном взаимодействии Казахстанского и Горноалтайского континентальных массивов в стадию герцинской коллизии, допускающей горизонтальное движение и вращение тектонических блоков.

Соответственно с уточненным вариантом районирования в Калба-Нарымском поясе разработано направление прогнозно-поисковых работ на редкие металлы, включая полузакрытые и закрытые площади на его северо-западном фланге (в Шульбинском потенциально рудном районе). В Казахстане такие резервные площади в ближайшие годы будут изучаться на стадии глубинного геологического картирования – ГГК-200 [8]. Обоснованием для постановки работ в Шульбинском районе служат следующие данные: 1) непосредственное продолжение северо-западного фланга Калба-Нарымского редкometалльного пояса, перекрытого в основном чехлом рыхлых отложений; 2) широкое развитие скрытых гранитоидных массивов (по геолого-геофизическим материалам); 3) интенсивная проработка надинтрузивной зоны отдельных выходов гранитных массивов (гранитизация, гнейсизация, окварцевание и др.); 4) прямые признаки оруденения в виде кварцево-жильных рудопроявлений (W, Sn, Bi), генетически связанных с гранитами калбинского комплекса (Кожанкуль, Коростелевское, Степановское и др.); 5) выявление на участке «Ржавая Сопка» крупной дайки кварцевых порфиров (возможно онгонитов), интен-

сивно метаморфизованной, повышенной фтористости и оловоносности и другие признаки. Это предполагает наличие на глубине рудоносных гранитов, перспективных на Ta-Sn оруденение редкометалльно-пегматитового и альбитит-грейзенового типов (аналоги месторождений Карасу, Кварцевого и др.). В первую очередь целесообразно проведение ГГК-200 на листе М-44-IX.

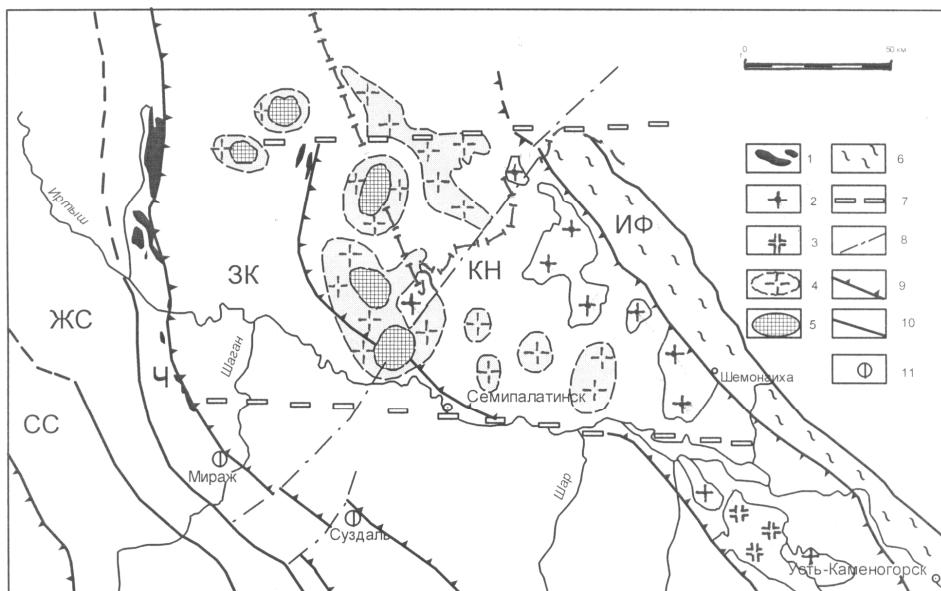


Рисунок 2 - Металлогеническое районирование территории Семипалатинского Прииртышья: 1 – гипербазитовая (PR?), 2 – гранитовая (P_1), и 3 – лейкогранитовая (P_2) формации; 4 – контуры скрытых гранитоидных массивов по геофизическим данным и 5 – их корневые утолщения; 6 – зона смятия; 7 – широтные и 8 – северо-восточные глубинные разломы; 9 – границы рудных поясов и 10 – металлогенических зон; 11 – золотосульфидно-кварцевая формация. Рудоносные структуры: ИФ – Иртышская металлогеническая зона, КН – Калба-Нарымский и ЗК – Западно-Калбинский рудные пояса, Ч – Чарская, ЖС – Жарма-Саурская и СС – Сиректас-Сарсазанская металлогенические зоны Жарма-Саурского рудного пояса

В результате научно-исследовательских работ в целом по Калба-Нарымскому поясу уточнены закономерности формирования и размещения редкометалльных месторождений с построением геолого-генетических моделей рудообразующих систем и типовых эталонных объектов как основы прогнозно-металлогенического анализа [7]. Произведена количественная оценка ресурсов Ta, Nb, Be, Li, Sn. С целью открытия новых месторождений и повышения эффективности редкометалльной отрасли необходимо возобновить поисковые работы на современном научно-техническом уровне с использованием новых технологий глубинного геологического картирования, привлечением значительных объемов геофизических и буровых работ и выполнением высокоточных аналитических исследований.

Западно-Калбинский золоторудный пояс размещается в центральной части Большого Алтая, имеет региональное развитие (длина более 800 км, ширина 20-40 км), проникая на юго-восточном фланге в Китай, а на северо-западе прослеживается в России. Сформировался в коллизионной геодинамической обстановке во фронтальной части Горноалтайской континентальной окраины и в настоящее время рассматривается в составе Зайсан-

ской сутурной зоны [1]. По особенностям глубинного строения характеризуется субокеаническим типом разреза ЗК, в гравитационном поле отмечается областью высоких градиентов силы тяжести [3, 9]. По геолого-геофизическим данным в центре структуры выделяется протяженный терригенный прогиб (D_1-C_1) северо-западного простирания, осложненный в бортах глубинными островодужными поднятиями (раннегерцинская рифтогенно-островодужная стадия). Для коллизионного этапа развития характерны молассовые лимнические, частью угленосные формации (C_2-C_{2-3}). Активизация глубинных разломов (в режиме переменного сжатия – растяжения с элементами вращения) сопровождалась внедрением золотоносных малых интрузий и даек габбро-диорит-гранодиорит-плагиогранитовой серии (C_{2-3} - C_3). Для концентрации золотого оруденения благоприятны рудовмещающие отложения повышенной карбонатности и углеродистости (аркалыкская $C_1 v_{2-3}$, буконьская C_{2-3} свиты). Установлено распределение золоторудных объектов на трёх рудоносных геохронологических уровнях: 1) островодужный $D_3 fm-C_1 v_{2-3}$, 2) предколлизионный $C_1 s$ и 3) коллизионный C_2-C_3 . В позднюю (постколлизионную) стадию в обставке внутриплитной активизации локализовались отдельные массивы гранитоидов с бедным оруденением – Sn, W, Be (дельбегетайский комплекс P_2).

Рассматриваемый пояс объединяет важнейшие золотоносные структуры региона, многие рудные узлы, рудные поля и месторождения суздальского, кулуджунского и бакырчикского типов. Среди них бакырчикский тип золото-сульфидно-углеродистой формации характеризуется высокой продуктивностью, объединяя ряд промышленных месторождений в Кызыловской зоне смятия (Бакырчик, Большевик, Глубокий Лог и др.). Практическое значение имеет суздальский тип золотосульфидно-кварцевой формации, представленный минерализованными зонами дробления в тектонически нарушенных карбонатно-терригенных толщах (месторождения Суздальское, Мираж и др.) и имеющий определённое сходство с известным «карлинским типом» золотого оруденения в карбонатных породах [1, 13]. В результате исследований разработаны критерии и предпосылки для поиска новых золоторудных объектов.

Важное рудоконтролирующее значение придается Зайсанской сутурной зоне, в которой локализовались приразломные пояса золотоносных малых интрузий и даек (кунушский комплекс C_3) и связанные с ними собственно золоторудные месторождения различных рудноинформационных типов. В процессе сложного геодинамического развития в Зайсанской сутуре сформировался Чарско-Горностаевский офиолитовый пояс, фиксирующий зону мантийного глубинного разлома. Его юго-восточное продолжение дугообразной формы огибает с юга Сибирскую платформу и фрагментарно прослеживается в структуре Центрально-Азиатского подвижного пояса на значительное расстояние. На северо-западном фланге офиолитовый пояс образует резкий подворот в меридиональном направлении и продолжается на территории России под чехлом рыхлых отложений Кулундинской впадины (рис. 2). Такая планетарная позиция Чарско-Горностаевского пояса и Зайсанской сутурной зоны в целом выявляется при анализе металлогенической карты Центральной Азии масштаба 1:2 500 000, подготовленной специалистами из России, Казахстана, Китая и других стран, которая демонстрировалась на Международном геологическом конгрессе в Норвегии (2008 г.).

По металлогенической специализации Зайсанская сутурная зона характеризуется совмещением сидерофилов докембрия (Fe, Cr, Ni, Co, Pt) с сидеро-халькофильным оруднением каледонид (Fe, Mn, Pb, Zn), преимущественно халькофильной рудоносностью герцинид (Au, Ag, As, Sb, Hg) и проявлением Ni-Co оруденения и золота в мезозойских корах выветривания. Именно в пределах этой структуры сформировались главные собст-

венно золоторудные месторождения региона (Бакырчик, Большевик, Сузальское, Кулдукун и др.). Выявленные особенности развития Зайсанской сутуры раскрывают новые возможности для прогнозирования оруденения, особенно на ее слабо изученных флангах в Семипалатинском Прииртышье и Северном Призайсанье.

Жарма-Саурский пояс сформировался на гетерогенном докембрийском и каледонском фундаменте Казахстанской континентальной окраины. В его северо-восточной части, в Чарско-Горностаевском офиолитовом поясе локализовались докембрийские руды (Cr, Ni, Co и др.) в связи с прорезаниями гипербазитов в надвигово-меланжевых структурах, выжатых в стадию герцинской коллизии, а золото-рутное оруденение концентрировалось в процессе метаморфизма и регенерации в эту же стадию. Позднее в мезозойских корах выветривания образовались Ni-Co руды (Чарская и Горностаевская группы месторождений).

На границе Чарской и Западно-Калбинской тектонических зон в постколлизионную стадию внутриплитной активизации сформировался Семипалатинско-Буран-Бургынский пояс гранитоидов повышенной щелочности (P_2), специализированных на цирконий-титановое оруденение. В Преображенском массиве с ними связаны остаточные коры выветривания месторождения Караптель (Zr, Ti), за счет перемыва которых образовалась Сатпаевская россыпь ильменита. Рассматриваемый пояс, на большей части закрытый рыхлыми отложениями, прогнозируется нами на выявление скрытых и погребенных редкometально-редкоземельных месторождений.

На границе Жарма-Саура и Чингиз-Тарбагатая, в Сиректас-Сарсазанской металлогенической зоне также в постколлизионную стадию активизации (P_1-T_1) локализовались интрузии гранит-лейкогранитов и щелочных гранитов, специализированных на редкometальное (W, Mo) и редкоземельное (Zr, Nb, TR, Ta) оруденение (месторождения Шор, Верхнее Эспе и др.).

Центральная часть Жарма-Саурского пояса характеризуется мощным развитием синеклизаационных интрузий габбро-диорит-гранодиорит-плагиогранитовой серии ($C_1 - C_{2-3}$), продуктивных на медно-порфировое, сульфидное медно-никелевое и золотое оруденение (саурский, максутский и другие комплексы).

В контроле медно-порфирового оруденения важная роль придаётся кольцевым вулкано-тектоническим структурам. По геолого-геофизическим данным предполагается обнаружение скрытых и погребённых месторождений Cu, Ni, Co, Mo, Ag (Pt) на закрытых резервных площадях (Базарский прогиб, Северное Призайсанье и др.). Здесь целесообразно проведение глубинного минерагенического картирования масштаба 1:200 000.

Максутский Cu-Ni тип оруденения связывается с расслоенными габброидными интрузиями (C_{2-3}). Это гипабиссальные малые интрузии и дайкообразные тела позднеколлизионной стадии активизации, контролируемые глубинными разломами и имеющие региональное развитие. В последние годы на юго-восточном фланге Жарма-Саурского пояса (в Китае) в аналогичных габброидах обнаружено новое месторождение Харатунга (Колотонк), которое по запасам никеля является крупным, а по меди – средним [2, 10, 12]. Поэтому наметился региональный Максут-Петропавловско-Харатунгский прерывистый пояс потенциально рудоносных габброидных интрузий и резко повысились перспективы обнаружения подобных сульфидных Cu-Ni месторождений на территории Восточно-Казахстанского региона. Это даёт основание возобновить поиски месторождений на выделенных перспективных участках. Основное внимание должно быть уделено поиску скрытых и погребённых Cu-Ni месторождений.

Таким образом, модель развития Большого Алтая в системе Центрально-Азиатского под-

важного пояса отражает длительность и сложность формирования геологических и металлогенических структур в процессе коллизии окраин Сибирского и Казахстанского микроконтинентов с последующей внутриплитной тектономагматической активизацией (P_1-T_1) и континентальным рифтогенезом и стабилизацией в мезозой-кайнозое. С этих мобилистских позиций произведена оценка перспектив изученной территории на цветные, благородные, редкие металлы и другие полезные ископаемые, и разработаны направления дальнейших поисковых работ.

Список литературы

1. Дьячков Б. А. Основные закономерности формирования и размещения золоторудных месторождений, ассоциирующих с карбонатно-терригенными формациями Восточного Казахстана / Б.А. Дьячков, Н.П. Майорова, З.И. Черненко, О.Н. Кузьмина // Науки о Земле в Казахстане. - Алматы: КазГЕО, 2008. - С. 159-167.
2. Беспаев Х.А. Геология и металлогения Юго-Западного Алтая: (в пределах территории Казахстана и Китая) / Х.А. Беспаев, Н.В. Полянский, Ганженко и др. - Алматы: Фылым, 1997. - 288 с.
3. Большой Алтай (геология и металлогения). - Кн. 1: Геологическое строение / Г.Н. Щерба, Б.А. Дьячков, Н.И. Стучевский и др. - Алматы: Фылым, 1998. - 304 с.
4. Большой Алтай (геология и металлогения). - Кн. 2: Металлогения / Г.Н. Щерба, Х.А. Беспаев, Б.А. Дьячков и др. - Алматы, РИО ВАК РК, 2000. - 400 с.
5. Глоба В.А. Месторождение Манка - новый геолого-промышленный тип месторождений золота (Южный Алтай) // Изв. НАН РК. Сер. Геол. - 2006. - № 5. - С. 20-28.
6. Дьячков Б.А. К вопросу о перспективах золотого оруденения на Южном Алтае / Б.А. Дьячков, В.Н. Майоров; Под общ. ред. В.Е. Кислякова // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: Сб. науч. тр. - Красноярск, 2006. - С. 52-56.
7. Дьячков Б.А. Редкометалльные рудно-магматические системы Восточного Казахстана // Геология Казахстана / Б.А. Дьячков, Т.М. Никитина, Н.П. Майорова. - Алматы, 2004. - С. 222-229.
8. Акылбеков С.А. Резервы развития минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых / С.А. Акылбеков, Б.С. Ужленов, Е.М. Щелчков // Геология Казахстана. - Алматы, 2008. - С. 121-125.
9. Любецкий В.Н. Глубинное строение золоторудных поясов, вмещающих суперкрупные месторождения (Западно-Калбинский пояс, Казахстан) / В.Н. Любецкий, Л.Д. Любецкая // Материалы Международной конф. «Условия формирования, закономерности размещения и прогнозирования месторождений полезных ископаемых», 1-4 нояб.- Ташкент, 2006. - С. 69-75.
10. Глотов А.И. Петрология сульфидного медно-никелевого месторождения Колотонк (Северо-Западный Китай) / А.И. Глотов, А.П. Кривенко, Г.В. Поляков, Е.А. Уварова // Геология и геофизика. - 2002. - Т. 43. - № 11. - С. 990-1001.
11. Wand Zhong. Geological feature dure of Duola gold deposit in Xinjiang Geology. 1992. - Vol.10. - № 1 (Tol 33). - P. 62-73.
12. Shenghao Y, Zhaochong Z. Kalatongke magmatic copper-nickel sulfide deposit. Tectonic evolution and metallogenesis of the Chinese Altay and Tianshan International Symposium of the IGCP-473 project in Urumqi. - August 9-21, 2003. - P. 132-151.
13. Padtke A.S. Geology of the Carlin gold deposit, Nevada/ Professional Paper 1267. U. S. Geological Survey, 1985. - 124 p.

Получено 29.04.09

УДК 622.271:622.341

В.Х.Кумыков, Т.М. Кумыкова
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**КАЛИМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ДОБЫЧЕ КОМПЛЕКСНЫХ РУД СЛОЖНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ**

Калиметрический контроль процесса добычи комплексных руд призван обеспечить однородность рудной массы по содержанию основного металла, на который настроена технологическая линия обогатительной фабрики при флотационном обогащении. Колебания содержания полезного компонента в ту или иную сторону приводят к безвозврат-

ным потерям металла в хвосты обогатительного передела. Так же имеют место непроизводительные энергетические затраты, связанные с предварительной шихтовкой типов руд для обеспечения однородности рудопотока. Поэтому ставится задача квалиметрического контроля в процессе добычи типов и сортов руд комплексных месторождений. Данная задача решена для горно-геологических условий Николаевского медно-цинкового полиметаллического месторождения, разрабатываемого одноименным карьером.

Месторождение занимает промежуточное положение между осевой частью Алейского антиклиниория и Иртышской зоной смятия и локализовано в пределах Каменевской брахисинклинали. Рудная залежь, приуроченная к Западному и Центральному тектоническим блокам, в плане имеет подковообразную форму, открытую в северо-западном направлении, а в разрезе - линзообразную, осложненную раздувами и пережимами. Падение изменяется от полого - на крайнем северо-западе до крутого (60-70) $^{\circ}$ - на востоке. Контакты с вмещающими породами сложные. Руды по составу и внешнему облику представляют в основном скопления сульфидов нескольких видов. По вещественному и минералогическому составу выделяются руды: окисленные и первичные. Вертикальное распространение окисленных руд на глубину до 70 м. Большая часть запасов представлена первичными сульфидными рудами. Между зоной первичных и окисленных сульфидных руд распространены так называемые смешанные или частично окисленные руды.

По текстурно-структурным особенностям и обогатимости руды подразделяются на кристаллические, метаколлоидные и переходные. Предпоследний тип отличается от кристаллических содержанием и формой полезных компонентов. В них в десять раз больше свинца и окиси бария, в семь раз - цинка, в три раза - золота, мышьяка, в четыре раза - серебра, чем в кристаллических. В последних больше нерудных минералов - глинозема, окиси магния и других. Метаколлоидные руды слагают висячий бок рудной залежи на Центральном участке и распространены повсеместно. Кристаллические руды приурочены висячему боку карьерного разлома в границах Центрального блока. По классификации УНИПРОМЕДИ месторождение отнесено к типу пожароопасных. Это предъявляет особые требования к технологии производства буровзрывных работ, добыче, транспортированию и складированию рудной массы. Экспериментальными исследованиями ВНИИцветмета, проведенными лабораторией открытых горных работ в разные годы, установлено, что при температуре 390 $^{\circ}\text{C}$ метаколлоидные руды воспламеняются. Кристаллические руды более устойчивы и обнаруживают склонность к эндогенным пожарам при температурах 400-430 $^{\circ}\text{C}$ (содержание серы более 35 %).

По технологическим свойствам руды месторождения делят на следующие сорта:

1. Сфалерит-халькопиритовая (медно-цинковая) руда; содержание меди - 3,68 %, цинка - 3,98 %, свинца - 0,50 %; (67 % объема всех запасов).
2. Пирит-сфалеритовая (цинковая) руда; (25 % запасов). Содержание меди 0,92 %, цинка - 5,03 %, свинца - 0,65 %.
3. Пирит-халькопиритовая (медная) руда - 7 % запасов. Содержание меди - 4,07 %, цинка - 0,52 %, свинца - 0,12 %.
4. Серно-колчеданная руда - 1 % запасов. Содержание меди - 0,99 %, цинка - 0,52 %, свинца - 0,18 %.

Технический проект, составленный институтом КАЗГИПРОцветмет, предусматривает отработку 93 % запасов всех сортов руд открытым способом пятнадцатиметровыми уступами.

Традиционная технология разработки Николаевского месторождения включает вало-

вую отбойку и выемку руд при высоте рудных уступов 15 метров. На погрузке пород вскрыши предусмотрены экскаваторы ЭКГ-8И с ковшом вместимостью 8 м³ и производительностью 1800 м³ в смену. Рудная масса грузится экскаватором ЭКГ-5А в автосамосвалы БелАЗ-548 грузоподъемностью 40 т. Среднее расстояние откатки до рудных складов 1200 м. Предусмотрено обогащение руд на местной фабрике по схеме с получением коллективного концентратата и последующей переработкой по КИВЦЭТной технологии. По селективной схеме флотации выделение свинца в самостоятельный продукт практически осуществить невозможно, так как свинец в руде (на 85-87 %) представлен окисленными формами, из которых 40 % - труднообогатимые метаколлоидные руды.

Результаты экспериментальных исследований, отразившие сложность морфологии оруденения месторождения, доказали низкую эффективность раздельной выемки руд пятнадцатиметровыми уступами, т.к. при этом потери руд и металлов оказываются чрезмерными. Так же доказано, что при отработке высокооцененных полиметаллических руд, а также руд, склонных к возгоранию в условиях изменчивости контуров оруденения массивов и перемежаемости типов и сортов руд, рациональным является переход на подуступную выемку типов и сортов руд. Преимущество перехода на подуступную выемку типов руд, склонных к самовозгоранию, заключается в снижении вероятности возникновения очагов рудничных пожаров за счет интенсификации отработки обнаженных в нескольких плоскостях рудных блоков.

Известно, что основным недостатком снижения высоты уступов в рудной зоне является удорожание добывчих работ. Кроме того, в зависимости от конкретных горногеологических условий, переход на подуступную выемку запасов может привести к увеличению значения текущего коэффициента вскрыши и снижению интенсивности углубки карьера. При этом в случае недостаточности резерва вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов снижается производительность карьера.

Целесообразность перехода на подуступную отработку общих запасов можно обосновать на основе экономического критерия, позволяющего оценить преимущества данной технологии по сравнению с другими. В общем случае целевая функция будет иметь следующий вид:

$$\Pi(h) = \left\{ \frac{1-\eta}{1+\rho} \left[\sum_{i=1}^m P_i \cdot \alpha_i \cdot \varepsilon_i \cdot I_i \right] - a^{(h)} - n_m b - \frac{V^{(h)}}{D^{(h)}} \cdot (b^{(h)} - b) - d \right\} \rightarrow \max \quad (1)$$

для следующих ограничивающих условий:

$$A_{t,m} \rightarrow \text{const} \quad (2)$$

$$A_p \rightarrow \max \quad (3)$$

где α_i – содержание I-го металла в товарной руде;

$A_{t,m}$ и A_p – производительность карьера соответственно по горной массе и руде

$$A_i = (B \alpha_{\delta i} - \Delta P \alpha_{T i} + \Delta V \alpha_{n i}) / D. \quad (4)$$

Тогда, выразив количество потерянной руды ΔP и примешиваемых пород ΔV через их коэффициенты, получим коэффициент добычи

$$(1 - \eta) / (1 + \rho) = \pi_k \quad (5)$$

и перепишем функцию (1) в виде:

$$\Pi(h) = \pi_k \left\{ \sum_{i=1}^m [P_i (\alpha_{\delta i} - \eta \alpha_{T i}) + \rho \alpha_{n i}] \right\}. \quad (6)$$

В формулах (1-6) приняты следующие обозначения:

α_{bi} - содержание г-го компонента в балансовых запасах, доли ед.;

m - число компонентов в добываемой руде;

α_{Ti} - содержание того же компонента или условного металла при добыче многосортных руд в теряемых запасах, доли ед.;

a_{pi} - то же в примешиваемых породах, доли ед.;

ε_i - извлечение i-го компонента в концентрат, доли ед.;

P_i - оптовая цена i-го компонента, тг/т;

$a^{(h)}$ - себестоимость добычи 1 т руды без погашения вскрыши для рассматриваемой толщины слоя (подступа), тг/т;

n_T - текущий коэффициент вскрыши с учетом потерь руды и его качества;

b - удельные затраты на выемку одного кубометра пустых пород;

$b^{(h)}$ - то же для рассматриваемой толщины слоя;

$V^{(h)}$ - объем пустых пород, удаляемых при вскрытии и подготовке горизонтов зон подступной выемки запасов, м³;

$D^{(h)}$ - количество добываемой товарной руды при подступной выемке, т;

B - количество погашаемых балансовых запасов, т;

d - затраты на транспортирование и обогащение одной тонны товарной руды, тг/т.

Параметры подступной выемки определяют полноту и качество выемки запасов сортов руд и в конечном итоге – экономическую эффективность разработки месторождения.

Закономерности взаимодействия геометрических параметров системы разработки и экономических показателей при выемке руд подступами могут быть установлены с помощью графоаналитического метода анализа карьерного поля с применением видоизмененного интегрального графика $V = f(\Sigma P_i)$. Исследования проводились на погоризонтных геологических планах масштаба 1:1000, куда выносились положения горных работ в динамике развития рабочей зоны карьера. Объемы руд и пород определялись планиметрическим способом.

Расчеты показали, что подступная выемка не приведет к нежелательным последствиям от возрастания значения текущего коэффициента вскрыши за счет перераспределения во времени объемов пустых пород и сортов руд при условиях:

- при вскрытии горизонта по центру рудной залежи:

$$m \leq b_T + h(Y) \cdot ctga + 2B_0 \quad (7)$$

- при вскрытии горизонта по контактам рудной зоны:

$$m \leq b_T + h(Y) \cdot ctga + B_0. \quad (8)$$

При этом математическое ожидание $M[x]$ оценки видимой мощности рудной залежи в пределах смежных горизонтов, отрабатываемых подступами, должно быть равным или больше ширины рабочей площадки B_0 :

$$M[x] \leq B_0. \quad (9)$$

Принятые следующие обозначения (7), (8), (9):

m - ширина зоны подступной выемки запасов руд, м; b_T - ширина разрезной траншеи по дну, м; $h^{(Y)}$ - высота, на которую будут сбиваться подступы при выемке пустых пород, м; a - угол откоса рабочего уступа.

Для соблюдения условий (7) и (8) необходимо производить сбойку уступов при выходе горных работ из зоны подступной выемки при организации горных работ поперечными экскаваторными заходками. Ширина данной зоны определяется равенством левой и правой частей формул (7), (8). На Николаевском карьере при такой организации горных работ значение текущего коэффициента вскрыши уменьшается на 0,67 м³/т. Изменение

величины прибыли на 1 тонну балансовых запасов в зависимости от высоты подступа приведено на рис. 1.

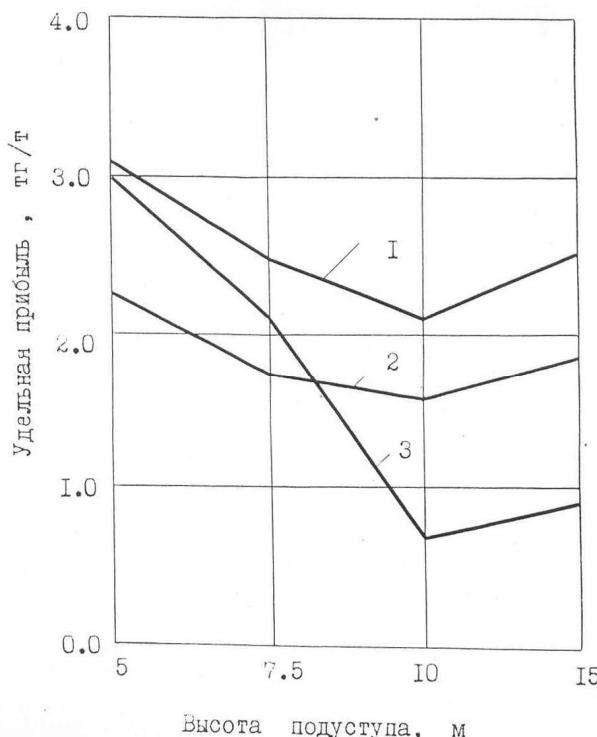


Рисунок 1 – Зависимость величины удельной прибыли от высоты подступа: 1 – при селективной отбойке и выемке руды; 2 – переход на подступную выемку при валовой отбойке; 3 – валовая отбойка и совместная выемка сортов руд

Для условий Николаевского карьера переход на подступную выемку с высотой подступа 5 м является оптимальным как при селективной, так и при валовой отбойке и добыве руд. По сравнению с выемкой рудной массой уступами высотой 15 м подступная выемка рудной массы обеспечивает прирост удельной прибыли 102,2 тг./т по схеме валовой добычи. Переход с валовой отбойки и валовой выемки на схему селективной выемки позволяет повысить величину удельной прибыли на 420,26 тг.

Особые требования к системе и параметрам разработки предъявляются при выемке типов и сортов руд, склонных к самовозгоранию. Это связано с опасностью самовозгорания их при отбойке и хранении в больших объемах.

Средняя температура самовозгорания пиритных руд при содержании серы 35 и более процентов Николаевского месторождения по данным экспериментальных исследований [1] составляет 376 °С, что на 16 % ниже средних температур воспламенения известных сульфидных месторождений. Опыт эксплуатации запасов месторождения показал, что в условиях самовозгорания в карьере добывается 10-14 % годового объема рудной массы всех сортов. Самовозгоранию подвержены участки, сложенные метаколлоидными и смешанными рудами, приуроченными к висячemu боку залежей. Вероятность возникновения эндогенных пожаров возрастает при обнажении руд в двух плоскостях, особенно в местах тектонических нарушений и зонах разломов. Минимальный срок от момента обнажения рудных блоков до возникновения очагов самовозгорания составляет 1,5-2 месяца.

ца. Горение руд приводит к снижению качества руды. После двухмесячного обнажения рудного тела блока 21 р количество вторичных минералов меди, свинца, цинка возросло соответственно на 1,8 %; 0,67 %; 5,3 %. В этой связи требуется разработать рациональную технологию выемки и хранения данного типа руд. Задача может быть решена на основе графоаналитического метода проф. А.И. Арсентьева [2] с применением графика $L=f(T)$. Метод усовершенствован нами применительно к разработке комплексных месторождений с учетом того, что:

1. Производительность экскаватора - переменная величина, зависящая от длины блока, ширины заходки, высоты уступа, схемы разворота автосамосвала у экскаватора. Параметр устанавливается нами по эмпирической формуле, учитывающей кусковатость горной массы, подлежащей экскавации.

2. Время подготовки горизонта - переменная величина, зависящая от изменчивости горно-геологических факторов, объема траншейных работ и количества экскаваторных блоков.

3. Коэффициент снижения производительности при проходке траншеи определяется по данным хронометражных наблюдений вскрытия и подготовки новых горизонтов, из которого можно установить рациональную скорость углубки карьера для выемки отбитой руды в нормативное время.

Если перейти на подуступ высотой 10 м, высоту второго подуступа надо принять равной 5 м, что упрощает организацию работ при сбое по выходу на вскрышной уступ. При этом вскрытие горизонта осуществляют временной въездной траншееей длиной 125 м экскаватором ЭКГ-5А № 1. Разрезная траншея проходит по контакту рудной залежи отрезками длиной 50 м. Рудные блоки ($B_1 \div B_2$) отрабатываются системой с поперечными экскаваторными заходками вкрест простирации. Выемку блока 7 (породного) производят экскаватором ЭКГ-8 и № 2, а вскрытие нижнего 5 м подуступа - экскаватором № 1. Увеличение скорости до 20,3 м в год - за счет совмещения работ по проходке и разносу траншеи.

При ведении добывочных работ подуступами высотой 7,5 м экскаватором ЭКГ-5А № 1 организация горных работ соответствует предыдущей схеме. Выемка объемов горной массы в блоках 1-7 ведется экскаватором № 1. В блоке 14 подуступы сдваиваются. Линия фронта работ отодвигается до границ, обеспечивающих возможность вскрытия нижнего горизонта при сохранении минимальной рабочей площадки (рис. 2). Скорость углубки карьера 20 м /год. При организации добывочных работ подуступами высотой 5 м на проходке въездной траншеи работает экскаватор ЭКГ-5А № 1. Им же по контакту рудного тела проходится разрезная траншея отрезками по 50 м. Совмещение работ при выемке пород второго подуступа ведут с блока 4, что сокращает время подготовки почти вдвое. При этом отработку рудных блоков ведут поперечными заходками экскаватором типа ЭКГ-8 и № 1 до линии фронта, обеспечивающего вскрытие двухнижних подуступов. Сбойка трех подуступов производится на границе блока 7, выемка которого осуществляется экскаватором ЭКГ-8 и № 2.

Анализ работ показывает, что по принятой организации с использованием одновременно двух экскаваторов с ковшами различной вместимости можно увеличить скорость углубки карьера за счет совмещения работ по проходке и снижении доли траншейных работ в первоначальном объеме подготовки.

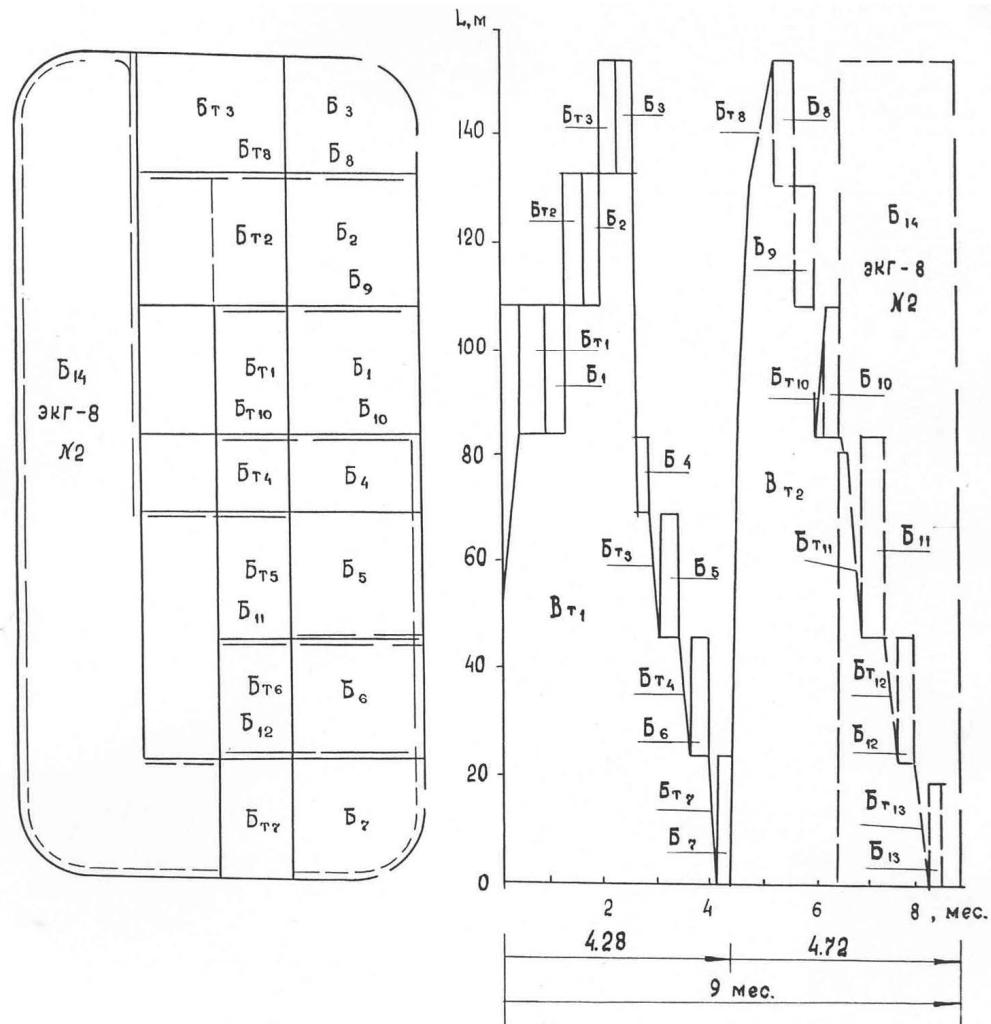


Рисунок 2 – График вскрытия и подготовки рудного горизонта подуступа, $h_1 = 10$ м, $h_2 = 5$ м

При этом величина совмещения работ при высоте подуступа, кратной общей высоте отрабатываемого блока, может быть определена по формуле:

$$\delta_T = \frac{b_T + h \cdot ctg \alpha}{n^3 \cdot [h \cdot (ctg \alpha + ctg \gamma)] + b_T + B_0}, \quad (10)$$

где n - количество подуступов; b_T - ширина разрезной траншеи по дну, м;

α - угол откоса рабочего уступа, град.; γ - угол направления углубки карьера, град.;

B_0 - ширина рабочей площадки, м; h - полная высота уступа, м.

Формула (10) означает, что управляя значениями параметров, формирующих блок, можно добиться значительного сокращения времени подготовки горизонта. Например, при продольной подготовке горизонта длиной экскаваторного блока 150-200 м общее время работ, если отрабатывать уступ высотой 15 м, занимает два месяца. Тот же объем работ при переходе на подуступы может быть выполнен за 21 день.

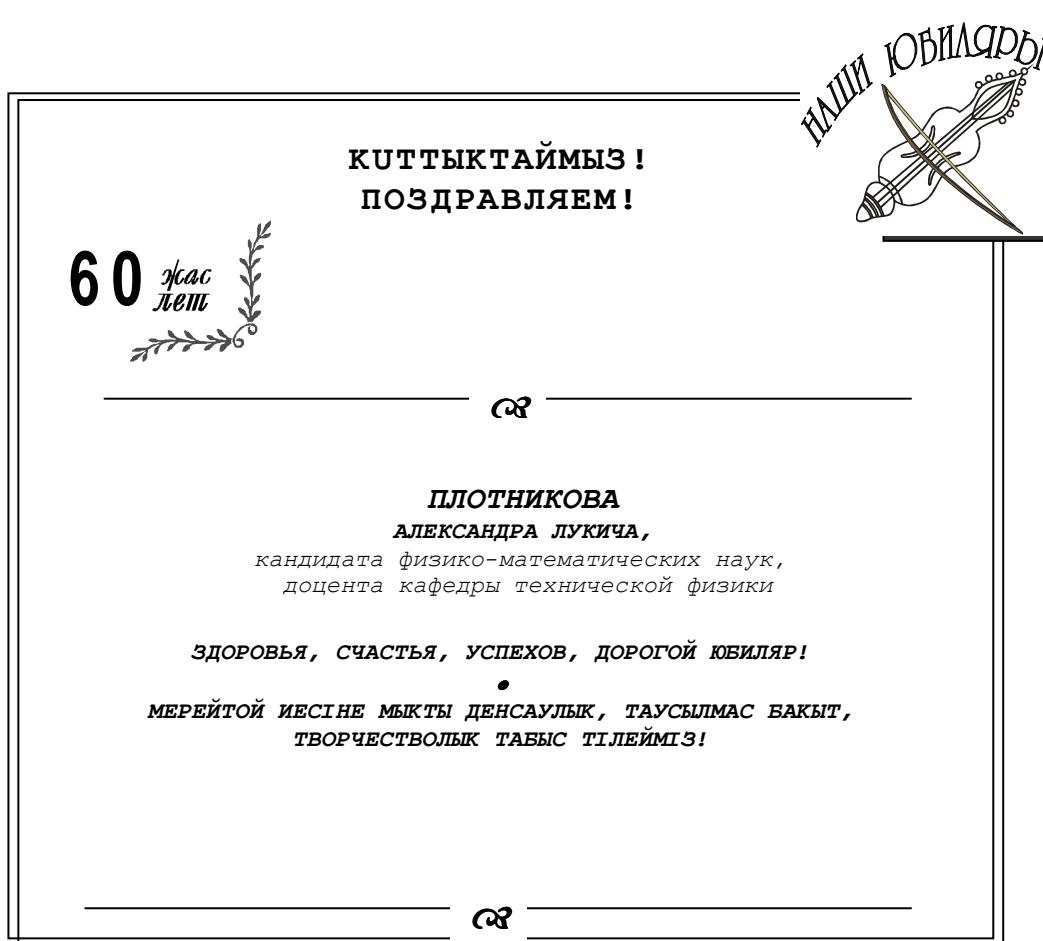
Таким образом, организация добывочных работ в Николаевском карьере подуступами высотой пять метров и поперечными экскаваторными заходками позволяет повысить

почти в три раза интенсивность выемки, что в условиях разработки пожароопасных месторождений очень важно. При этом обеспечивается более полное и рациональное использование разведанных запасов минерального сырья.

Список литературы

1. Кумыков В.Х. Исследование самовозгораемости руд. В кн.: Резервы повышения эффективности разработки рудных месторождений /В.Х. Кумыков, М.З. Тогузов. - Усть-Каменогорск, 1990. - С.27-35.
2. Арсентьев А.И. Вскрытие и системы разработки карьерных полей. - М.: Недра, 1981. - 268 с.

Получено 18.05.09



УДК 622.271:622.341

В.Х.Кумыков, Т.М. Кумыкова
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**ОПТИМИЗАЦИЯ НАПРАВЛЕНИЯ УГЛУБКИ КАРЬЕРА ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОМПЛЕКСНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Направление углубки карьера является определяющим параметром формирования рабочей зоны при организации добычных работ в режиме управления качества руд. От него зависят производительность и геометрические размеры карьера. Оптимизация данного параметра – важнейшая горно-технологическая задача, решаемая на каждом этапе развития карьера как сложной динамической системы.

Технология открытой разработки сложноструктурных полиметаллических месторождений многосортных руд отличается от подземных горных работ рядом известных преимуществ, в том числе возможностью эффективного управления качеством добычных работ при определенном методическом подходе к проблеме. Технология добычи руд рассматривается нами как многошаговый процесс управления технологической системой «карьер» на каждом временном отрезке t , $t \in T$, характеризующем состояние объекта с заданными параметрами (размеры и форма рабочей зоны, интенсивность развития горных работ, величина подготовленных и готовых к выемке запасов типосорта руды и др.). Здесь T – время работы карьера по достижении максимальной проектной производительности.

Задача состоит в создании системы управления горными работами, обеспечивающими плановую добычу сортов руды на каждом эксплуатационном горизонте по мере углубки карьера.

Для решения этой задачи предлагается метод пошаговой оптимизации направления развития горных работ в карьере. Данный технологический параметр принят нами в качестве управляющего. Метод базируется на идеях динамического программирования, концепции которого впервые разработаны Р. Беллманом и Р. Калабой [1].

Вычислительный аспект метода в случае его реализации в системе автоматизированного проектирования параметров карьера «САПР-карьер» состоит в следующем.

Допустим, что в пределах j -го горизонта ($j=1, k$) имеется сложный рудный забой с суммарным запасом технологических сортов руд равным $\sum_i^n \sum_i^k Q_{oj}^j$ ($i = \overline{1, n}$). Согласно утвержденному недельно-суточному графику, это количество можно добывать различными способами. Примем решение добывать руду раздельно по сортам при совместной отбойке на всю высоту рудного уступа h . Тогда Q_{ij} – запасы i -го сорта руды, эффективность выемки которых может быть выражена целевой функцией (функцией полезности или величиной удельной извлекаемой прибыли). Ее величина зависит от количества и качества добываемого сырья в соответствии с направлением развития и режимом горных работ.

Математическая формулировка задачи: надо отыскать среди всех возможных исходов такую стратегию, которая максимизировала бы значение функции полезности по мере

возрастания глубины карьера. Экономико-математическая модель решения данной задачи может быть представлена в следующем виде:

$$\Pi_{oi}^{(K)} \rightarrow \max \{ \Pi_{oi1}(Q_{ij=1}) + \Pi_{oi2}(Q_{ij2}) + \dots + \Pi_{oiK}(Q_{ij=K}) \} \quad (1)$$

для следующих условий

1) $Q_{ij=1} \geq 0, \dots, Q_{ij=K} \geq 0$ - запасы неотрицательны

2) $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K Q_{ij} \geq Q_B, i = \overline{1, n}; j = \overline{1, K}$ - суммарные запасы всех сортов руд, извлекаемых с горизонтов, не меньше балансовых в контуре карьера.

Для решения задачи требуется составить рекуррентные формулы, используя основное свойство метода динамического программирования, согласно которому для любого изначального состояния после некоторого этапа решения вся совокупность последующих шагов будет составлять оптимальную стратегию по отношению к состоянию, к которому пришли по результатам исходного этапа решений [2].

На основании свойства аддитивности функции (1), оптимальные исходы поиска траектории углубки карьера для управления технологическим процессом добычи руд по сортам предыдущих шагов суммируются до момента начала нового поиска максимума функции последующих стадий. Поэтому рекуррентная формула стратегии поиска на последующем шаге будет иметь следующую структуру:

$$\left. \begin{array}{l} \Pi_{oj=1}(Q_{ij=1}) \rightarrow \max \{ \Pi_{oj=1}(Q_{ij=1}) \}, \\ O \leq Q_{ij=1} \leq O_B, \\ x_{j=1}^{(1)} \leq x_{j=1}^{(0)} \leq x_{j=1}^{(2)}, \\ \Pi_{oj=K}(Q_{ij=K}) \rightarrow \max \{ \Pi_{oj=K}(Q_{ij=K}) + \Pi_{oj=K-1}(Q_{ij=K} - 1) \}, \\ O \leq Q_{ij=K}; Q_{ij=K-1} \leq O_B, \\ x_{j=K}^{(1)} \leq x_{j=K}^{(0)} \leq x_{j=K}^{(2)}; x_{j=K-1}^{(1)} \leq x_{j=K-1}^{(0)} \leq x_{j=K-1}^{(2)}. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Запись (2) означает: экстремум функции (1) достигается при расположении разрезных траншей на j -м и $j-1$ -м горизонтах в области углубки $x_{j=K}^{(1)} \leq x_{j=K}^{(0)} \leq x_{j=K}^{(2)}$; $x_{j=K-1}^{(1)} \leq x_{j=K-1}^{(0)} \leq x_{j=K-1}^{(2)}$ в границах рабочей зоны карьера в пределах рабочей зоны, если запасы на них не отрицательны, $j \in k$.

Из структуры рекуррентной формулы следует, что для отыскания оптимальной стратегии решения задач многошаговых технологических процессов однородной размерности надо испытать не все варианты, а лишь оптимальные выходы. Это возможно благодаря замене трудоемких вычислений по отысканию экстремума целевой функции по $X^{(j \in k)}$ переменным в исходной задаче оптимизации, в каждой из которых экстремум функции отыскиваем только по переменной. Отсюда следует, что планируя многоходовую стратегию поиска оптимальной траектории углубки с верхнего на нижележащий горизонт, необходимо выбирать управление на каждом из них с учетом возможных выходов на последующих горизонтах по оптимальному положению вскрывающей горной выработки в области x на j -м и $j-1$ горизонтах.

Согласно методу, процедуре поиска оптимального направления углубки карьера на-

чиаем с самого последнего горизонта карьера, для которого не существует последующих шагов, способных повлиять на выбор управления на последней стадии. Результатом такого методического приема является набор или совокупность оптимальных управлений на данной стадии для любых возможных состояний входа последней, т.е. на временном отрезке работы карьера $t, t \in T$ в области x_j -го горизонта.

Задача оптимизации направления развития горных работ решена нами для условий трех карьеров Жайремской группы барит-полиметаллических месторождений с целью организации посортной добычи пяти технологических сортов руд, выделенных по результатам геолого-технологического картирования рудного поля, проведенного с участием ВНИИцветмета.

В качестве целевой функции использовано аналитическое выражение коэффициента полезности вида:

$$R^{(k)} = \left[\frac{1+\rho}{1-\eta} \cdot \sum_j^k \frac{V_j}{\gamma_j} + \sum_i^n \sum_j^k \frac{Q_{ij}}{\gamma_{ij}} + \sum_i^n \sum_j^k Q_{ij}^D \cdot \xi \cdot \frac{1-\eta_{ij}}{1+\rho_{ij}} \right] / \Pi_{oi} \quad (3)$$

в области углубки в пределах рабочей зоны карьера $x_{j=1,K}^{(1)} \leq x_{j=1,K}^{(0)} \leq x_{j=1,K}^{(2)}$.

Функция (3) приобретает максимум при следующих ограничениях:

$$1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Q_{ij}^D \rightarrow \max \text{ - максимальное извлечение руды}$$

соответствует установленной области и направлению углубки карьера, где надо найти место заложения разрезной траншеи;

$$2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k C_{oj}, C_{pj} \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k U_{oj} \text{ - затраты на добычу и переработку рудной массы не превосходят суммарной извлекаемой ценности руды;}$$

3) $A_p(1+K_p) \leq Q_B \left(\frac{1-\eta}{1+\rho} \right) \cdot k_u$ - производительность карьера не больше величины извлекаемых запасов сырья.

В формулах приняты следующие обозначения:

k_i - коэффициент извлечения,

k_p - коэффициент резерва производительности;

ρ - качественные потери руды (разубоживание), обусловленные сложностью контакта руда-порода, руда-руды худшего качества, доли ед.;

η - объемные потери руды i -го технологического сорта, доли ед.;

V_i - объем пустых пород горизонта добычи, м³;

Q_{ij}^δ - часть запасов руды, снятых с баланса предприятия в результате их не подтверждения эксплуатационной разведкой, т;

$\tilde{\gamma}_i$ - объемный вес неподтвержденных запасов руд, т/м³;

Q_{ij}^D - достоверные запасы руды i -го сорта i -го горизонта, т;

ξ - комплексный показатель качества, учитывающий флотационную активность руд и извлечение металла в концентрат, доли ед. ($\xi=0,8$).

Задача решалась в САПР на основе программного комплекса «Поиск», с использованием серии поперечных геологических разрезов и погоризонтных планов.

Достоверность результатов исследований подтверждена принятием к проектированию разработанных рекомендаций для оптимизации систем и параметров второй очереди развития рудника открытых работ Жайремского ГОКа.

Календарный график добычных работ, разработанный с учетом возможных изменений схемы вскрытия, повысил эффективность работы комбината за счет стабилизации качества товарной руды и частичной ликвидации отставания вскрышных работ.

На основании вышеизложенного можно сделать основные выводы:

1. Предложенные метод и критерий оптимизации позволяют установить положение вскрывающих горных выработок на смежных горизонтах для организации добычи многосортных руд в режиме управления качеством рудной массы.

2. Эффективность добычи руд можно повысить за счет изменения схемы вскрытия горизонтов в соответствии с направлением развития горных работ.

3. Разработанная методика применима для организации посортной добычи практически на всех рудниках открытых работ, осуществляющих управляемую добычу твердых полезных ископаемых, в том числе при разработке угольных и горючих сланцев месторождений.

Список литературы

2. Беллман Р. Динамическое программирование и современная теория управления. - Пер. с англ. / Р. Беллман, Р. Калаба. - М.: Наука, 1969. - 118 с.
3. Кумыков В.Х. Выбор метода и критерия оптимизации направления развития горных работ в карьерах // Тр. ин-та ВНИИцветмет. - Усть-Каменогорск, 1983. - С. 68-72.
4. Кумыков В.Х. Совершенствование методики определения развития горных работ // Комплексное использование минерального сырья. - 1992. - № 8. - Алма-Ата, 1992. - С. 17-21.

Получено 18.05.09

УДК 550.83:553.43/574/

В.С. Портнов, М.П. Пузеева, Б.М. Кенжин

КарГТУ, г. Караганда

В.М. Юрлов

КарГУ им. Е.А. Букетова, г. Караганда

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ В МАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Методы равновесной термодинамики (точнее, термостатики) широко используются во многих областях геологических наук для определения Т-Р-координат различных минеральных и фазовых равновесий, для выявления соотношений состав-активность твердых растворов и расплавов, для характеристики распределения породообразующих и рассеянных элементов, используемых при определении температуры, давления минералообразования, степени фракционирования, путей эволюции магматических расплавов и т.д. [1]. Иначе дело обстоит в области различных методов измерения физических свойств пород и минералов. Для измерения некоторых физических свойств геологического объекта воздействуют на него каким-либо первичным полем (магнитным, электрическим и т.д.) и измеряют вторичное поле (отклик системы), величина которого несет информацию об

объекте, находящемся в определенных термодинамических условиях и обладающем термодинамическими параметрами, которые непосредственно связаны с его структурными, химическими и физическими свойствами.

Таким образом, с помощью неравновесной статистической термодинамики можно попытаться найти связь между микроскопическими (квантовыми) процессами взаимодействия первичных полей (параметры которых можно контролировать и изменять в широких пределах) с макроскопическими характеристиками геологического объекта. Именно такой подход и реализован нами в работе [2] применительно к магнитным измерениям.

Термодинамические аспекты в магнитометрии. Основными методами изучения магнитных свойств горных руд магнетитовых месторождений являются магнитометрический и индукционные.

Индукционные методы, к которым относится и метод искусственного подмагничивания (МИП), основаны на измерении отношения величины вторичного поля к первичному, которое зависит от магнитной восприимчивости, глубины залегания пород и их формы. На практике определяется вертикальная составляющая вторичного магнитного поля, создаваемого подмагниченными породами, и устанавливается корреляционная зависимость между содержанием железа в рудах и коэффициентом отображения К. В работе [2] мы применили методы неравновесной статистической термодинамики к вычислению коэффициента отображения К в методе МИП. В этой работе атомы железа, связанные с магнетитом (в общем случае, с любым магнитным минералом), рассматриваются как система невзаимодействующих магнитных диполей, погруженная в термостат (вмещающие породы). Квантовые переходы, обусловленные взаимодействием магнитных диполей с термостатом, будут диссипативными (с вероятностью Р), в отличие от взаимодействия с внешним магнитным полем (с вероятностью F). Диссипативные процессы приводят к тому, что вторичное поле меньше первичного. Для вероятности диссипативных процессов получено

$$P = \frac{2\Delta S}{k\tau} \exp\left\{-\frac{E_m - G^0/N}{kT}\right\}, \quad (1)$$

где ΔS - изменение энтропии при квантовом переходе; τ - время одночастичной релаксации ($\tau \approx 10^{-12}$ с); E_m - среднее значение энергии основного состояния магнитных диполей; G^0 - энергия Гиббса термостата; N - среднее число магнитных диполей; k - постоянная Больцмана; T - температура.

Учитывая, что $\exp\{-E_m/kT\} \approx 1$, а $F = 1/\tau_p$, τ_p - «радиационное» время жизни возбужденного состояния ($\tau_p \approx 10^{-15}$ с), для функции отклика подсистемы магнитных диполей получаем выражение

$$\Phi = \left(1 + \frac{2\Delta S}{k} \frac{\tau_p}{\tau} \exp\left(\frac{G^0/N}{kT}\right)\right)^{-1}. \quad (2)$$

Если в качестве функции отклика Φ взять коэффициент отображения К, используемого в методе МИП (отношение вторичного поля к первичному), то из (2) получим

$$K = A_1 \frac{C_{Fe}}{G_M^0}, \quad (3)$$

где $A_1 = kT/C$, $C = 2\Delta S\tau_p/k\tau$, $\tau_p\tau^{-1} \approx 5,4 \cdot 10^{-8}$; G_M^0 - энергия Гиббса магнетита;

C_{Fe} - концентрация железа в магнетитовой руде.

При $G_1^0 = 1,014 \text{ кДж моль}^{-1}$ из (3) получено уравнение связи коэффициента отображения с содержанием железа в руде, связанного с магнетитом, близкое к экспериментальным.

Погрешность определения C_{Fe} по К для Кентобинского, Сарбайского, Куржункульского, Соколовского месторождений Казахстана колеблется от 2,32 % до 0,98 % абс, при изменении коэффициента уравнения от 75,1 до 79,5.

Если в качестве функции отклика взять магнитную восприимчивость, то α (ед. СИ) определяется по формуле

$$\alpha = A_2 \frac{C_{Fe}}{G^0}, \quad (4)$$

где $A_2 = A_1 \cdot d$, d – коэффициент связи между К и α .

На рис. 1 показаны зависимости α и К от C_{Fe} , с хорошей точностью описываемые уравнением (3) и (4).

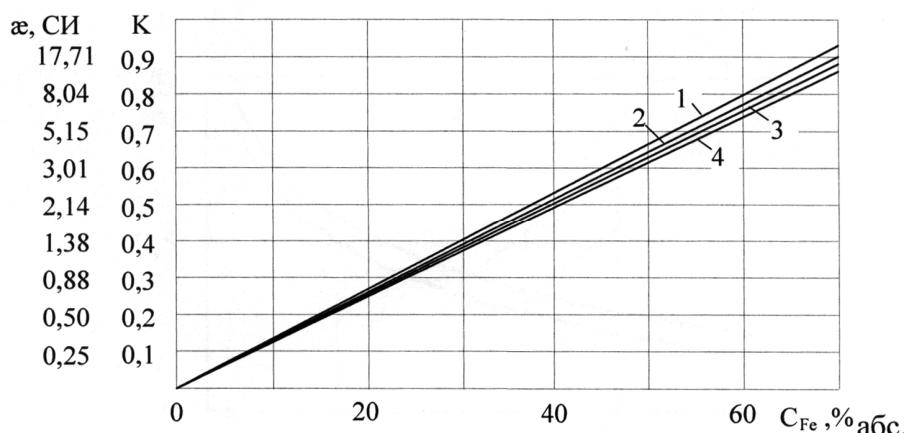


Рисунок 1 – Зависимости магнитной восприимчивости и коэффициента отображения от содержания железа, связанного с магнетитом: 1 - Кентобинское, 2 – Сарбайское, 3 – Куржункульское, 4 – Соколовское месторождения

Поскольку энергии Гиббса большинства железосодержащих минералов определены калориметрическим путем и приведены в справочниках, то соотношения (3) и (4) позволяют находить уравнения корреляционных связей между α и концентрацией железа, которые уточняются при получении достаточного статистического материала из результатов химических анализов.

Влияние давления на магнитную восприимчивость пород и руд. Магнитная восприимчивость большинства горных пород при увеличении давления уменьшается. Эмпирическую зависимость α от внешнего давления (P) впервые предложил С.П. Капица [3]

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \beta P}, \quad (5)$$

где коэффициент $\beta = \frac{1}{\alpha_0} \frac{d\alpha}{dP}$ для большинства магнетитосодержащих горных пород составляет от 10^{-4} до 10^{-3} см²/кг (от 10^{-10} до 10^{-9} Па⁻¹) [4,5].

Были предложены теоретические модели, описывающие зависимость α от P [6]. Суть большинства моделей сводилась к двум эффектам. Первый связан со смещением доменных границ под действием давления, второй – с вращением вектора спонтанной намагниченности.

Мы рассмотрим вопрос о связи α и P с точки зрения термодинамики. Выше получено выражение для магнитной восприимчивости в виде:

$$\alpha = A \frac{C_{Fe}}{G_0}, \quad A = 4\pi \frac{kT}{100C} \cdot N_A. \quad (6)$$

При изменении давления изменение энергии Гиббса равно

$$\Delta G^0 = \Delta H - T\Delta S + V\Delta P + P\Delta V = a + \Delta P, \quad (7)$$

где $a = (1/V)(\Delta H - T\Delta S + P\Delta V)$.

Тогда (6) примет вид

$$\Delta\alpha = A \frac{C_{Fe}}{1 + \beta\Delta P}. \quad (8)$$

Соотношение (8) по зависимости от давления совпадает с эмпирическим соотношением (5) и показывает, что с увеличением давления магнитная восприимчивость уменьшается. Это согласуется с экспериментальными данными, показанными на рис. 2 [7].

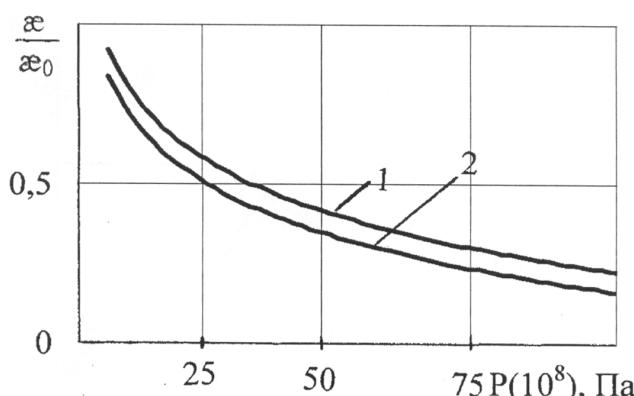


Рисунок 2 - Зависимости относительной магнитной восприимчивости от давления для магнетита (1) и титаномагнетита (2)

Изменение магнитной восприимчивости с глубиной разведочной скважины отмечалось в работах [3,8,9]. Этот результат непосредственно вытекает из (8), где $\Delta P = \sigma \Delta h$

$$\Delta\alpha = B \frac{C_{Fe}}{\Delta h}, \quad (9)$$

где $B = A/V\sigma \sim \text{const}$; Δh – изменение глубины скважины.

На глубине $h=1$ км при средней плотности пород $\sigma = 2,6$ г/см³ возникает давление 26 МПа. С увеличением глубины скважины изменение α резко возрастает и на глубине 10 км составляет около 40 %. Таким образом, влияние давления на результаты измерений магнитной восприимчивости следует учитывать в глубоких и сверхглубоких скважинах.

Влияние размера зерен магнетита на магнитную восприимчивость. Вопросы магнетизма малых ферромагнитных частиц исследуются уже давно [9]. Важность учета размера зерен ферромагнитных минералов в геофизических исследованиях подчеркивалась в работах [3, 8, 10]. В настоящее время эти вопросы не потеряли актуальность.

Основным механизмом, приводящим к зависимости магнитной восприимчивости от размера частиц ферромагнетика, считается переход многодоменных частиц в однодоменные. Критический размер (радиус d) однодоменной частицы, выше которого она становится двух- или многодоменной, определяется из энергетических соображений и обратно пропорциональна квадрату намагниченности насыщения J_s [9]

$$d = \frac{C}{J_s} \sqrt{\frac{A}{N_R}}, \quad (10)$$

где $C = 0,5; 1; 2$ для простой кубической, объемоцентрированной и гранецентрированной решетки, соответственно; A – параметр обменной энергии; N_R - размагничивающий фактор вдоль малой оси частицы.

Например, в случае сферической частицы

$$\text{Fe } (A \approx 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ эрг/см}, J_s = 1700 \text{ Гс}) d = 0,78 \cdot 10^{-6} \text{ см.}$$

В случае больших энергий анизотропии вместо (10) используется формула [4,8]:

$$d = \frac{9\omega}{4\pi J_s^2}, \quad (11)$$

где ω - плотность поверхностной энергии доменов. Например, в случае MnBi $\omega \approx 12 \text{ эрг/см}^2$, $J_s = 600 \text{ Гс}$ и из (11) находят $d = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ [4,9].

Изменение радиуса зерна ферромагнетика приводит к изменению давления P на межфазной границе, описываемого уравнением Кельвина

$$\frac{P}{P_0} = \exp\left(\frac{2\sigma\vartheta}{rRT}\right), \quad (12)$$

где r – радиус зерна; σ - межфазное поверхностное натяжение; ϑ - молярный объем; P_0 – давление над плоской поверхностью.

Поскольку $G^0 = H - TS + VP$, то вдали от точки Кюри из соотношения (12) следует

$$\alpha = \text{const} \exp\left(-\frac{2\sigma\vartheta}{rRT}\right). \quad (13)$$

Разлагая экспоненту в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами, получим

$$\alpha = \text{const} \cdot \left(1 - \frac{d}{r}\right), \quad (14)$$

$$d = \frac{2\sigma\vartheta}{RT}. \quad (15)$$

Удельная намагниченность магнетитов Соколовского, Сарбайского месторождений исследовалась на вибрационном магнитометре. Размер зерна магнетита определялся на микроскопе МИМ-8. Результаты показаны на рис. 3. В координатах $\alpha/\alpha_0 \sim 1/r$ экспериментальная кривая спрямляется в соответствии с (14), давая значение $d = 0,36 \text{ мкм}$.

Для гематита и ряда других ферромагнетиков аналогичные рис. 1 результаты были получены ранее в работе [8]. В частности, для гематита получена величина $d = 150 \text{ мкм}$.

Для магнетита $\vartheta = 44,5 \text{ см}^3/\text{моль}$, и из соотношения (15) для поверхностного натяжения σ получаем: $\sigma = 10,07 \cdot 10^3 \text{ эрг}/\text{см}^2$, для гематита - $\sigma = 6,2 \cdot 10^6 \text{ эрг}/\text{см}^2$.

Расчет плотности поверхностной энергии для магнетита по формуле (10) ($J_s = 4,9 \cdot 10^5 \text{ А}/\text{м}$) дает $\omega = 10,1 \cdot 10^3 \text{ эрг}/\text{см}^2$, что совпадает с полученной нами величиной σ . Для гематита ($J_s = 2 \cdot 10^3 \text{ А}/\text{м}$) формула (10) дает $\omega = 0,8 \cdot 10^6 \text{ эрг}/\text{см}^2$, что почти на порядок меньше σ . Это обусловлено слабой магнитной анизотропией гематита и, следовательно, некорректностью использования соотношения (10).

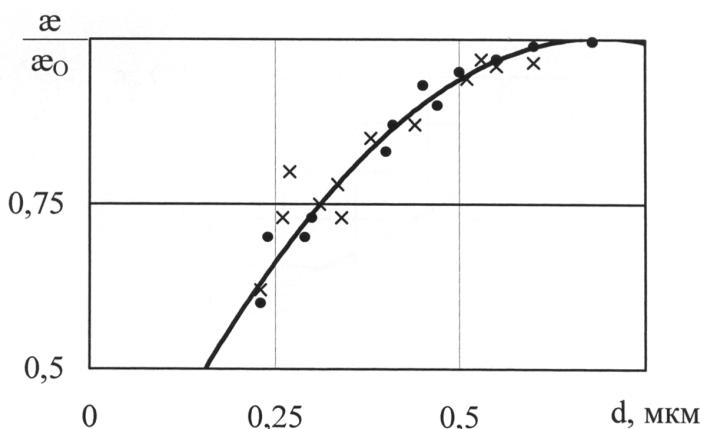


Рисунок 3 – Зависимость относительной магнитной восприимчивости от диаметра зерна магнетита: • магнетиты Сарбайского месторождения; × магнетиты Соколовского месторождения

В общем случае поверхностное натяжение σ и плотность поверхностной энергии ω не совпадают. Это различие было впервые подчеркнуто еще Гиббсом. Впоследствии Шаттльвортом и Херингом было получено уравнение, связывающее эти две величины

$$\sigma = \omega + \Omega(\partial\omega/\partial\Omega)_T, \quad (16)$$

где Ω – площадь поверхности твердого тела.

Для частиц сферической формы $\Omega = 4\pi r^2$ и с учетом соотношения (10) имеем из (16)

$$\sigma = \omega + \frac{4\pi}{9} J_s^2 \cdot d = \omega + \delta\omega. \quad (17)$$

Для магнетита $\delta\omega \approx 10 \text{ эрг}/\text{см}^2$ и практически не вносит вклада в $\omega \sim 10^4 \text{ эрг}/\text{см}^2$, поэтому в этом случае мы и получили хорошее совпадение σ и ω .

Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердого тела представляет собой значительные трудности. С достаточной точностью ее определение проведено только для ряда чистых металлов вблизи точки плавления [11].

Сделаем еще одну оценку. Для железа в работе [12] экспериментально получено $\sigma = 204 \text{ эрг}/\text{см}^2$, и соотношение (15) дает для критического радиуса $d = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ см}$, что по порядку величины совпадает с результатом формулы (10). Различие обусловлено, возможно, погрешностью при расчете параметра обменной энергии A .

Суммируя результаты проведенных выше расчетов, можно сделать вывод о возможности использования соотношений (14) и (15) для определения поверхностного натяжения магнитных материалов по экспериментальным зависимостям $\alpha = \alpha(r)$. Используя (17), можно вычислить и поверхностную энергию.

Сделаем еще ряд замечаний. Формулы (10) и (11) не дают явной зависимости критического радиуса d от температуры, на что впервые было указано еще Неелем. Полученное нами соотношение (15) показывает зависимость $d \sim 1/T$. Это позволяет использовать результаты термомагнитного анализа [13] для получения дополнительной информации о величинах σ и ω .

Поскольку молярный объем $\vartheta = M/\rho$ (M – молярная масса, ρ - плотность), то из (15) следует уменьшение d с ростом плотности ферромагнетика. Технологически это возможно достичь, создавая твердые растворы магнитных материалов.

Поверхностные напряжение и энергия играют определяющую роль в физике спекания, в процессах адсорбции и ряде других, заметно влияющих на магнитные свойства материалов. Расчетам этих величин всегда уделялось большое внимание, начиная с начала XX века, однако количественное согласие экспериментов и теории оказывалось неудовлетворительным. Это было связано и с отсутствием надежных экспериментальных методов определения величин σ и ω . Возможно, что представленная выше модель и использование соотношений (14) и (15) позволит продвинуться в этом направлении. Отметим также, что для сильномагнитных веществ σ и ω практически совпадают.

Влияние минерального состава на магнитные свойства минералов. Для бинарного твердого раствора (13) примет вид

$$\alpha = \text{const} \cdot \frac{1 - X_1}{[X_1 G_1^0 + (1 - X_1) G_2^0]}, \quad (18)$$

где X_1, X_2 – мольные доли компонент; G_1^0, G_2^0 - их энергии Гиббса.

Уравнение (18) описывает влияние минерального состава руд на результаты магнитных измерений, показанных на рис. 4. Его анализ показывает, что наличие в магнетитовой руде минералов с различной энергией Гиббса приводит к изменению α . Зависимости для многокомпонентных растворов получены аналогично.

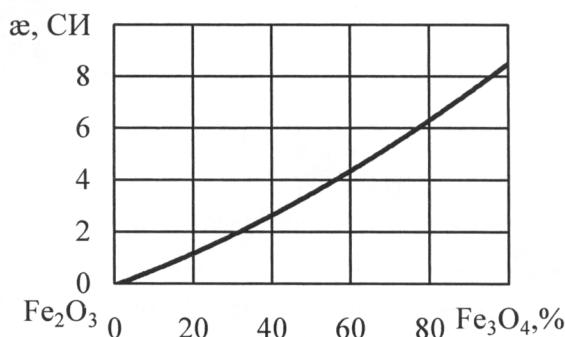


Рисунок 4 – Зависимость магнитной восприимчивости от соотношения компонент в системе Fe₃O₄-Fe₂O₃

При индукционных измерениях функция отклика $\Phi \sim \Delta\epsilon/\epsilon = \alpha/1+\alpha$ и для бинарной смеси при $T = 0$ (температура Кюри) получаем

$$\theta = \text{const} \cdot [X_1 (G_1^0 - G_2^0) + G_2^0]. \quad (19)$$

Экспериментально этот результат получен Т. Нагатой (рис. 5).

При $T = T_{\text{обр}}$ (температуре образования твердого раствора) получаем

$$T_{\text{обр}} = A_3 \frac{1 - X_1}{\ln X_1 + \ln X_2}, \quad (20)$$

где A_3 – постоянная, которая вычисляется для конкретной смеси.

Для системы $\text{MgSiO}_3\text{-FeSiO}_3$ при $X_1=0,4$ и $X_2=0,6$ и $\alpha=7 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ выражение (20) дает $T_{\text{обр}}=766\text{K}$. У разных авторов для этой системы $T_{\text{обр}}$ колеблется от 660 до 770К. Уравнение (20) может быть использовано в геологической термометрии, а (9) - в геологической барометрии.

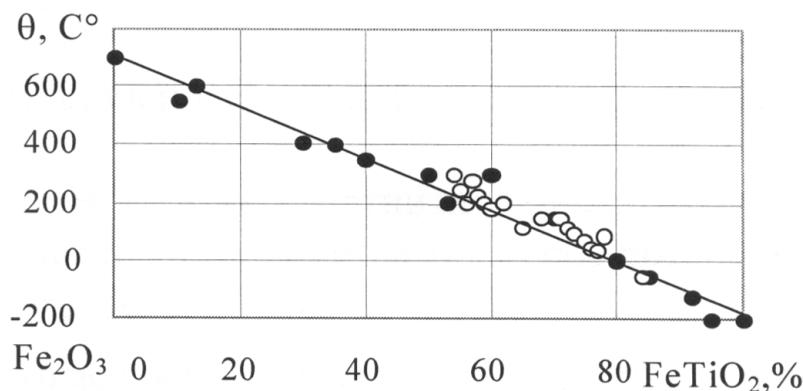


Рисунок 5 – Зависимость температуры Кюри в системе ильменит-гематит (точки – данные Т. Нагаты, линия - расчет по (19))

Таким образом, нами предложена модель, в рамках которой объясняются многие закономерности изменения магнитных свойств минералов при воздействии различных факторов.

Список литературы

1. Буд Б.Д. Основы термодинамики для геологов / Б.Д. Буд, Д.Г. Фрейзер. - М.: Мир, 1981. - 184 с.
2. Портнов В.С. Связь магнитной восприимчивости магнетитовых руд с термодинамическими параметрами и содержанием железа / В.С. Портнов, В.М. Юров // Известия вузов. - Горный журнал. - № 6. - 2004. - С. 122-127.
3. Капица С. П. Магнитные свойства изверженных горных пород при механических напряжениях //Изв. АН СССР. Сер. геофиз. - 1955. - № 6. - С. 489-504.
4. Шолпо Л. Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. - Л.: Недра, 1977. - 182 с.
5. Kinoshita H. Studies on piezo-magnetization //J. Geom. Geoel., 1968. - Vol. 20. - № 2. - Р. 75-83.
6. Гусев Б.В. Магнетизм пород траповой части формации западной части Сибирской платформы / Б.В. Гусев, В.В. Металлова, Ф.С. Файнберг. - Л.: Недра, 1967. - 84 с.
7. Трухин В.И. Введение в магнетизм горных пород. - М.: МГУ, 1973. - 275 с.
8. Нагата Т. Магнетизм горных пород. - М.: Мир, 1965. - 346 с.
9. Вонсовский С.Б. Магнетизм. - М.: Наука, 1971. - 1032 с.
10. Кудрявцева Г.П. Ферромагнетизм природных оксидов. - М.: Недра, 1988. - 232 с.
11. Гохштэн А.Я. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. - М.: Наука, 1976. - 256 с.
12. Скрипов В.П. Проблемы кристаллографии / В.П. Скрипов, П.Г. Ясонов. - М.: Наука, 1987. - С.232-246.
13. Буров Б.В. Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород / Б.В. Буров, П.Г. Ясонов. - Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1979. - 128 с.

Получено 20.05.09

УДК 539.2: 669.15'74-194

М.К. Скаков

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

Э.В. Козлов, Н.А. Попова

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

А.М. Жилкашинова

ВКГУ им. С.Аманжолова, г. Усть-Каменогорск

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛИ 110Г13Л: РОЛЬ ЛЕГИРИУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ

Легирующие элементы, такие, как Cr и V, вводят в марганцевую аустенитную сталь с целью повышения механических свойств [1-5]. Проведенные механические испытания на ряде марганцевых сталей обнаружили, что чем меньше в стали содержание углерода и марганца, тем выше значение предела текучести и коэффициента деформационного упрочнения. Введение в сталь легирующих элементов Cr и V привело к значительному увеличению предела текучести и вместе с тем снизило коэффициент деформационного упрочнения. При рассмотрении причин такого поведения следует учитывать, прежде всего, структурное состояние сплава в исходном состоянии. Поэтому целью настоящей работы явилось выяснение вопроса, связано ли улучшение механических свойств, вследствие введения в сталь этих элементов, с заметными изменениями характера тонкой структуры и фазового состава.

В качестве материала исследования использовалась аустенитная сталь Fe-Mn-C. Сплавы исследовались в закаленном от 1050 °C состоянии после предварительной ковки.

Для идентификации кристаллографической структуры исследуемого материала использовалась методика, описанная в работе [6].

Матрицей всех сталей Fe-Mn-C в зависимости от концентрации Mn и C является либо твердый раствор на основе γ-Fe (аустенит), либо твердый раствор на основе α-Fe (α-мартенсит), а также ε-мартенсит, образующийся в результате закалки при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении (рис.1).

Проведенные исследования показали, что в сталях, относящихся к первой группе (~1 вес. % C), матрица сплавов, независимо от содержания в них Mn, является полностью аустенитной. Данные объемных долей фаз, полученные методом рентгеноструктурного анализа, приведены на (рис. 1, a).

Пример участка рентгенограммы, содержащей рефлекс (111) γ-фазы, приведен на рис. 2. Из рис. 2 видно, что на рентгенограмме присутствуют рефлексы, относящиеся только к γ-фазе.

Иная картина наблюдается в сталях, содержащих 0,4-0,5 вес. % C (стали, относящиеся ко второй группе). Матрица стали, содержащей ~6 вес. % Mn, представлена в основном

α -фазой, или α -мартенситом. Изменение объемных долей фаз, по данным рентгеноструктурного анализа, приведено на (рис. 1, б). Доля γ -фазы (аустенита) невелика и не превышает 10 % от общего объема матрицы стали (рис. 1, б, кр. 1). Повышение содержания Mn до ~12 вес. % привело к тому, что доля γ -фазы возросла до 80 % (рис. 1, б, кр. 1). Рефлексы, относящиеся к α -фазе при содержании Mn в количестве ~12 вес. %, на рентгенограмме отсутствуют, зато присутствуют рефлексы, указывающие на наличие ϵ -фазы (ϵ -мартенсита). Объемная доля ϵ -фазы при содержании Mn ~12 вес. % составляет ~20 % (рис. 1, б, кр. 3). Дальнейшее увеличение содержания Mn (~16 вес. %) привело к полной аустенизации матрицы стали (рис. 1, б).

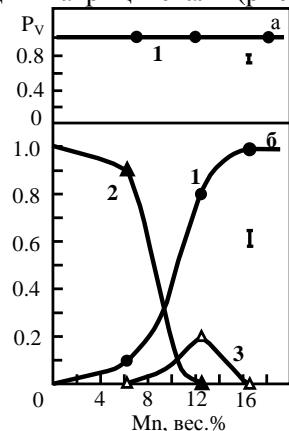


Рисунок 1 - Влияние содержания Mn на объемную долю γ (1), α - (2) и ϵ - (3) фаз в сталях Fe-Mn-C при различной концентрации углерода:
а – 1 вес.% С; б – 0,4 вес. % С. Данные рентгено-структурного анализа

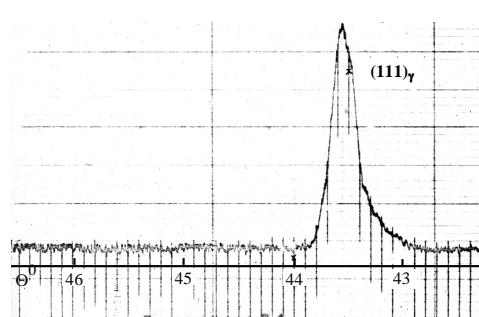


Рисунок 2 - Дифрактограмма рефлекса (111) γ -фазы закаленной стали Fe-Mn-C (~1 вес. % C, 12 вес. % Mn)

Таким образом, проведенные исследования методом рентгеноструктурного анализа показали, что увеличение содержания Mn в сталях Fe-Mn-C, содержащих ~0,4 вес. % C, изменяет фазовый состав матрицы. Вначале стабильным оказывается α -мартенсит. Затем, по мере увеличения содержания Mn в стали, появляется γ -фаза, которая становится все более устойчива. В стали с содержанием 12 вес. % Mn устойчивой является также и ϵ -фаза.

Введение легирующих элементов Cr и V в стали, относящиеся к первой группе (содержащие ~1 вес. % C), при всех исследованных концентрациях Mn не изменило фазовый состав их матрицы. Это хорошо видно на рис. 3, а, на котором представлены количественные данные рентгеноструктурного анализа – по-прежнему, матрица сталей остается полностью аустенитной.

В сталях, относящихся ко второй группе, т.е. содержащих 0,4-0,5 вес. % C, введение легирующих элементов Cr и V также не привело к изменению в фазовом составе матрицы по сравнению с нелегированными сталями этой группы. А именно, матрица сталей также представляет собой смесь трех фаз: γ , ϵ и α . Пример участка рентгенограммы, подтверждающей присутствие мартенситных фаз α и ϵ , приведен на рис. 4. Количественные данные фазового анализа, полученные методом рентгеноструктурного анализа для сталей второй группы, легированных элементами Cr и V, представлены на (рис. 3, б). Видно, что в стали, содержащей 9,5 вес. % Mn, объемная доля γ -фазы составляет ~50 %, доля α -фазы

– ~45 % и ε -фазы – ~5 %. Увеличение содержания Mn до 14 вес. % и выше привело к полной аустенитизации матрицы стали. Таким образом, введение даже такого небольшого количества легирующих элементов Cr и V приводит к расширению γ -области и уменьшению объемных долей как α -, так и ε -мартенсита. Это хорошо видно из сравнения соответствующих кривых на рис. 1, б и рис. 3, б. Полученные нами результаты не противоречат данным более ранних работ [1-3,7-11], полученным с использованием косвенных методов исследования.

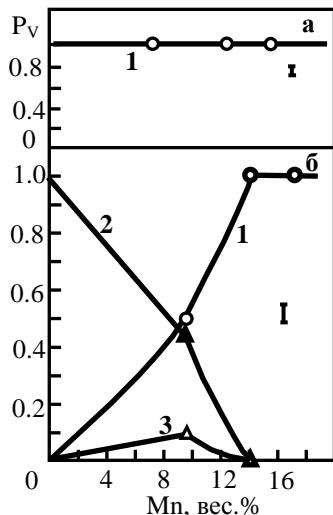


Рисунок 3 - Влияние содержания Mn на объемные доли γ (1), α (2) и ε (3) фаз в сталях Fe-Mn-C, легированных элементами Cr и V, при различной концентрации углерода: а – 1 вес.% С; б – 0,4 вес. % С. Данные рентгеноструктурного анализа

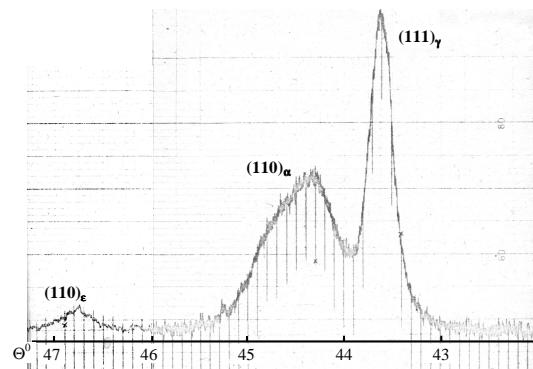


Рисунок 4 - Дифрактограмма рефлексов (111) γ -фазы, (110) α -фазы и (110) ε -фазы закаленной стали Fe-Mn-C (~0,4 вес. % С, 6 вес. % Mn), легированной элементами Cr и V

Известно, что с помощью рентгеноструктурного анализа можно обнаружить наличие любой фазы при содержании её в количестве, не менее 2 %. Для выявления фаз в меньших количествах необходимо использовать метод электронной просвечивающей микроскопии. Кроме того, только метод электронной просвечивающей микроскопии дает представление о тонкой структуре материала на качественном уровне и позволяет изучать её изменение на количественном уровне.

Проведенные исследования методом электронной просвечивающей микроскопии подтвердили, что в нелегированных сталях, относящихся к первой группе (с содержанием углерода ~1 вес. %), матрица является полностью аустенитной. Пример дислокационной структуры для сталей, относящихся к первой группе, представлен на (рис. 5, а). Видно, дефектная структура представлена, в основном, хаотически расположеными дислокациями. В отдельных местах удается наблюдать образование длинных дислокаций (рис. 5, б), вытянутых вдоль направлений $<110>$, параллельных следам пересечений плоскостей $\{111\}_\gamma$ с поверхностью фольги. Это свидетельствует о том, что эта сталь имеет достаточно низкую энергию дефектов упаковки и дислокации расщеплены на частичные. И поэтому дислокациям энергетически выгодно располагаться вдоль этих направлений. Еще

реже в сталях присутствуют скопления, также вытянутые вдоль направлений $<110>_{\gamma}$. Соответствующий пример приведен на (рис. 5, в). Это расщепленные дислокации. В стали, содержащей 18,2 вес. % Mn, встречаются также и дефекты упаковки (рис. 5, г). Была рассчитана скалярная плотность дислокаций. Оказалось, что увеличение содержания Mn практически не влияет на величину средней скалярной плотности дислокаций γ -фазы (рис. 6, кр. 1).

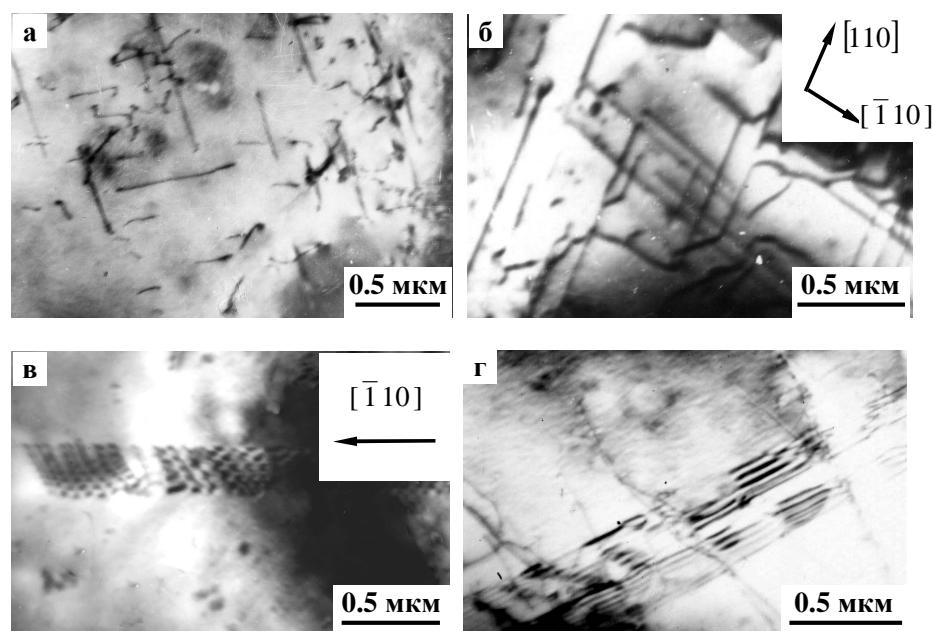


Рисунок 5 - Примеры дислокационных структур в нелегированных сталях Fe-Mn-C, относящихся к первой группе: а – дислокационный хаос; б – длинные дислокации; в – дислокационные скопления; г – дефекты упаковки

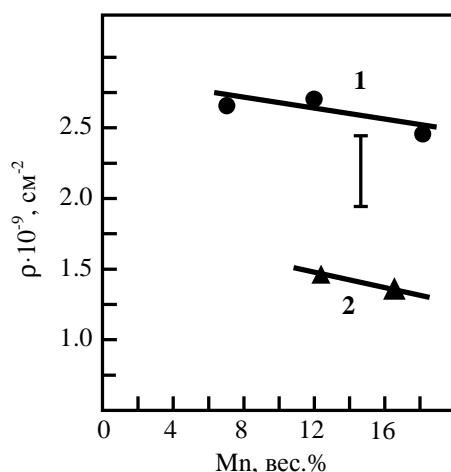


Рисунок 6 - Влияние содержания Mn на величину средней скалярной плотности дислокаций в γ -фазе в сталях Fe-Mn-C при различной концентрации углерода: 1 – ~1 вес. % С; 2 – ~0,4 вес. % С

Одновременно с формированием дислокационной структуры в процессе закалки происходит формирование механических (или, как их еще называют, деформационных) микродвойников в виде отдельных пакетов. Каждый пакет состоит из групп параллельных микродвойников, плотно расположенных, с частичным заполнением объема между ними матричным материалом. Как показали проведенные исследования, двойникование всегда начинается от границы зерна. Оканчиваться микродвойники могут внутри зерна, а могут простираться через все зерно вплоть до противоположной границы. В сталях, содержащих 6,9 и 12 вес. % Mn, во всем объеме зерна присутствует лишь одна система микродвойников (рис. 7, а); в сталях, содержащих 18,2 вес. % Mn, – одна и две системы (рис. 7, б). При этом пакеты

микродвойников расположены вдоль плотноупакованных плоскостей $\{111\}_\gamma$.

Дефектная структура γ -фазы в нелегированных сталях, относящихся ко второй группе, как и в сталях первой группы, представлена хаотически расположенным дислокациями. Однако средняя скалярная плотность дислокаций в этих сталях ниже (рис. 6, кр. 2). В зависимости от содержания Mn в стали присутствуют длинные дислокации, дислокационные скопления и дефекты упаковки, вытянутые вдоль направлений $\langle 110 \rangle_\gamma$. Отметим, что и дислокационные скопления, и дефекты упаковки присутствуют только в стали, содержащей 16,6 вес. % Mn, причем в довольно значительном количестве.

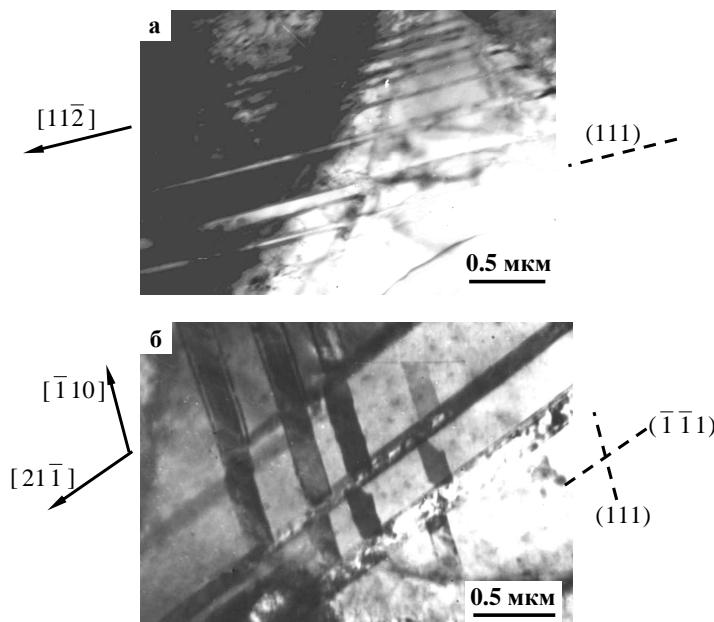


Рисунок 7 - Деформационные микродвойники одной (а) и двух (б) систем в γ -фазе нелегированных сталей Fe-Mn-C, относящихся к первой группе. Стрелками отмечены направления выделения микродвойников относительно плоскостей матрицы, пунктирными линиями – соответствующие им следы габитусных плоскостей

Как и в сталях, относящихся к первой группе, закалка приводит к формированию деформационных микродвойников. Расположение и вид микродвойников – такие же, как и в сталях первой группы. Выделение микродвойников происходит также по плоскостям $\{111\}_\gamma$. Оказалось, что в стали, содержащей 16,6 вес. % Mn, объемная доля зерен, охваченных двойникование, не превышает 5 %. В стали, содержащей 12,2 вес. % Mn, двойников намного меньше (их встречча носит случайный характер), а в стали, содержащей 6,2 вес. % Mn, двойники вообще отсутствуют.

Проведенные исследования методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием матричных уравнений [6] показали, что во всех нелегированных сталях, относящихся ко второй группе, закалка приводит к образованию ϵ -мартенсита, объемная доля которого зависит от содержания Mn. В стали, содержащей 16,6 вес. % Mn, ϵ -мартенсит присутствует либо в виде отдельных пластин, либо в виде пакетов пластин с габитусом $\{111\}_\gamma$. Необходимо отметить, что ϵ -мартенсита в стали мало, и пластины ϵ -

марктенсита не простираются через все зерно γ -фазы, а заканчиваются внутри его. Это означает, что $\gamma \rightarrow \epsilon$ превращение развито недостаточно. Зато в стали присутствует много дефектов упаковки и скоплений дислокаций. Ранее считалось, что зародышами ГПУ ϵ -фазы являются дефекты упаковки [12-14]. Позднее [15] утверждалось, что наиболее благоприятными для зарождения ϵ -фазы являются участки структуры, где есть плоские дислокационные скопления.

Другая картина наблюдается в стали, содержащей 12,2 вес. % Mn. Уже по изображениям, полученным методом оптической микроскопии, видно, что иглообразные пластины ϵ -марктенсита присутствуют почти в каждом аустенитном зерне (рис. 8).

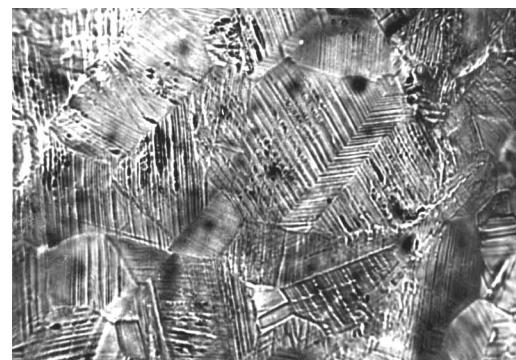


Рисунок 8 - Оптическое изображение структуры нелегированных сталей Fe-Mn-C (0,36 вес. % С и 12,2 вес. % Mn). Присутствует смесь γ - и ϵ -фаз

Исследования, проведенные методом просвечивающей электронной микроскопии, показали, что ϵ -марктенсит представляет собой пакеты пластин, причем нередко двух пересекающихся систем, одна из которых препятствует распространению другой (рис. 9).

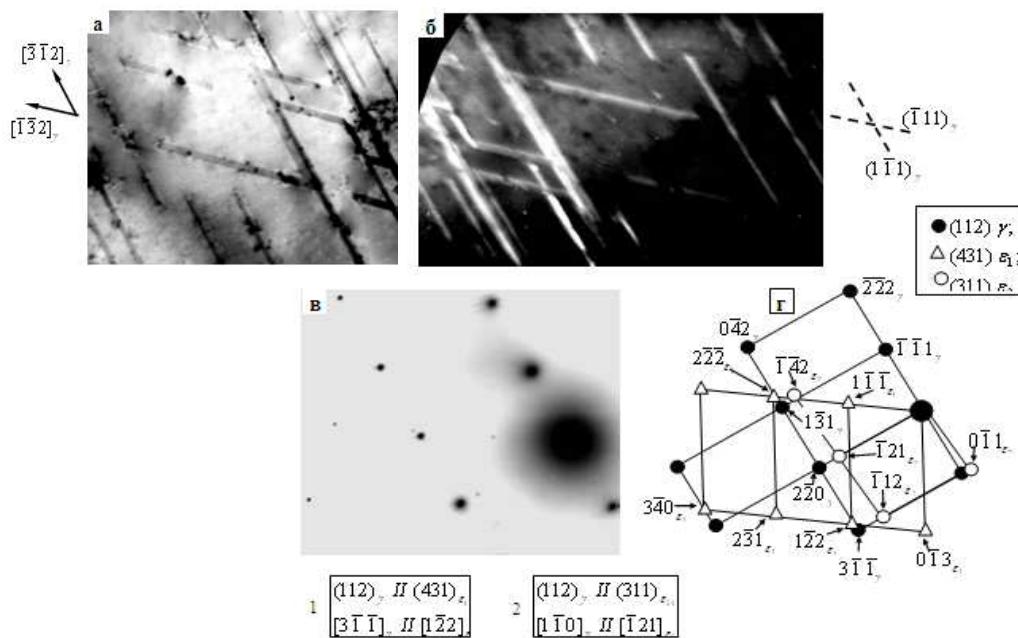


Рисунок 9 - Две пересекающиеся системы пластин ϵ -мартенсита в зерне γ -фазы закаленного сплава Fe-Mn-C (0,36 вес. % С и 12,2 вес. % Mn): а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение, полученное в рефлексах $[2\bar{2}\bar{2}]_{\epsilon_1} + [\bar{1}\bar{4}2]_{\epsilon_2}$; в – микродифракционная картина и г – её индицированная схема. Стрелками на (а) показаны направления выделения пластин ϵ -мартенсита, пунктирными линиями на (б) – следы габитусных плоскостей

Это свидетельствует о том, что пластины ϵ -мартенсита будут являться существенным препятствием для пластического течения. Из рис. 9 видно, что пластины по внешнему виду похожи на дефекты упаковки. Однако микродифракционная картина, полученная с этого участка, и темнопольное изображение подтверждают наличие ϵ -фазы. Каждая пластина ϵ -мартенсита в пакете является, в свою очередь, пакетом тонких пластинчатых образований. Это может указывать также на то, что зародышем ϵ -мартенсита явились дефекты упаковки, которые в этой стали обнаружены не были. Не наблюдалась и частично расщепленные дислокации.

В структуре сталей, относящихся к первой группе и дополнительно легированных Cr и V, наблюдаются некоторые изменения по сравнению с картиной изменения нелегированных сталей. Матрица сталей, независимо от содержания в них Mn, остается полностью аустенитной. Это хорошо согласуется с данными рентгеноструктурного анализа и еще раз подтверждает, что легирование железомарганцевых сталей элементами Cr и V приводит к расширению γ -области [1-3,9-11]. Хотя дислокационная структура также представлена хаотически распределенными дислокациями, величина средней скалярной плотности зависит от концентрации Mn: чем меньше содержится его в стали, тем ниже величина ρ .

Особенности дислокационной структуры исследуемых сталей тесно связаны с энергией дефектов упаковки. В определенном интервале концентрации Mn энергия дефектов упаковки убывает с ростом содержания Mn [16-17]. Поэтому во всех исследуемых образцах присутствуют длинные дислокации и дислокационные скопления, вытянутые также вдоль плотноупакованных направлений типа $<110>_\gamma$. Это связано с расщеплением сверхчастичных дислокаций. Чем больше содержания Mn, тем больше длинных дислокаций и скоплений. Дефектов упаковки ни при одном содержании Mn обнаружено не было. Механические двойники в стали присутствуют в незначительном количестве.

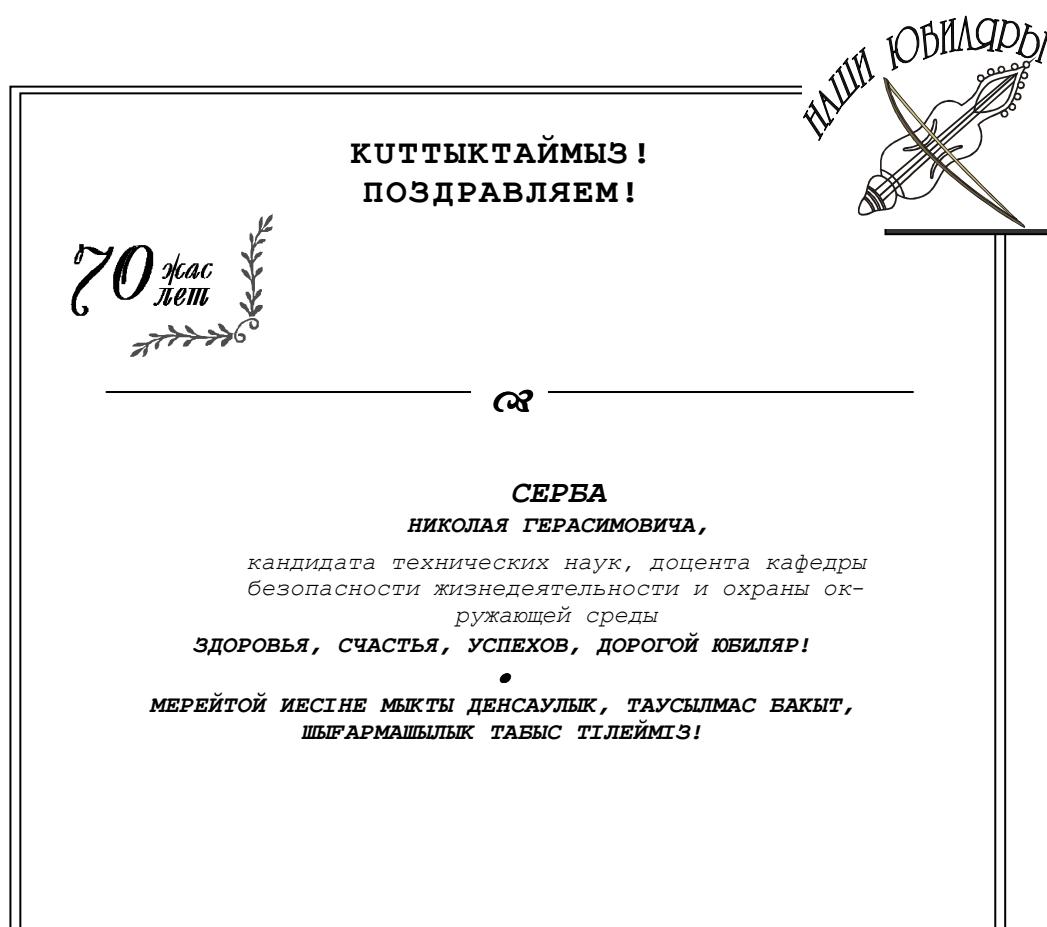
Данные рис. 1, б и 3, б хорошо коррелируют с данными работ [16, 17]. Очевидно, что уменьшение энергии дефектов упаковки стабилизирует γ -фазу по сравнению с α -фазой. Исчезновение α -фазы при концентрации ~12 вес. % Mn связано также с развитием ϵ -фазы, которую также стабилизирует энергия дефектов упаковки.

Таким образом, легирование стали элементами Cr и V, во-первых, смещает область существования ϵ -фазы в сторону меньшей концентрации Mn и, во-вторых, влияет на содержание α -фазы, несколько увеличивая её. Здесь, по-видимому, сказывается совместное влияние электронной структуры и энергии дефектов упаковки.

Настоящая работа выполнена на основании долгосрочного договора о научно-техническом сотрудничестве между Восточно-Казахстанским государственным университетом им. С. Аманжолова и Томским государственным архитектурно-строительным университетом.

1. Григорьев А.Г. Сплавы с железом, хромом и марганцем. - М.: АН СССР, 1952. - 256 с.
2. Гудремон Э. Специальные стали. - М.: Металлургия, 1959. - 236 с.
3. Жилкашинова А.М. Карбидообразование в стали Гад菲尔да / А.М. Жилкашинова, М.К. Скаков, Э.В. Козлов // Изв. НАН РК. Серия физ.-мат. - 2008. - № 2. - С. 8-12.
4. Жилкашинова А.М. Исследование влияния С и Mn на структурно-фазовое состояние матрицы закаленной стали 110Г13Л / А.М. Жилкашинова, М.К. Скаков, Э.В. Козлов // Изв. НАН РК. Серия физ.-мат. - 2008. - № 2. - с. 13-17.
5. Богачев И.Н. Структура и свойства железо-марганцевых сплавов / И.Н. Богачев, В.Ф. Еголаев. - М.: Металлургия, 1973. - 295 с.
6. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. - М.: Металлургия, 1973. - 584 с.
7. Соколов О.Г. Железомарганцевые сплавы / О.Г. Соколов, К.Б. Кацов. - Киев: Наукова думка, 1982. - 216 с.
8. Волынова Т.Ф. Высокомарганцевые стали и сплавы. - М.: Металлургия, 1988. - 343 с.
9. Канн Р. Физическое металловедение. - М.: Мир, 1967. - 333 с.
10. Бугаев В.Н. Взаимодействие и распределение атомов в сплавах внедрения на основе плотно-упакованных металлов / В.Н. Бугаев, В.А. Татаренко. - Киев: Наукова думка, 1989. - 184 с.
11. Григоркин В.И. Влияние углерода, марганца, пластической деформации и термической обработки на структуру и свойства аустенитной марганцовистой стали / В.И. Григоркин, Г.В. Коротушенко // МИТОМ, 1968. - № 2. - С. 48-51.
12. Богачев И.Н. Влияние хрома на фазовые превращения и упрочнение сталей типа Г13 и З0Г10 / И.Н. Богачев, Т.Д. Эйсмонт // ФММ. - 1970. - Т.30. - № 6. - С. 1213-1220.
13. Лысак Л.И. Физические основы термической обработки стали / Л.И. Лысак, Б.И. Николин. - Киев: Техника, 1975. - 304 с.
14. Курдюмов Г.В. Превращения в железе и стали / Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. - М.: Наука, 1977. - 236 с.
15. Еголаев В.Ф. Дефекты в деформированном аустените и e-фазе / В.Ф. Еголаев, Л.Д. Чумакова, Р.Ш. Шкляр // Изв вузов. Черная металлургия. - 1967. - № 10. - С. 140-144.
16. Богачев И.Н. Электронно-микроскопические исследования структурных превращений в железомарганцевых сплавах / И.Н. Богачев, Л.В. Журавль, В.Ф. Еголаев // ФММ. - 1968. - Т.25. - № 5. - С. 708-712.
17. Гольдштейн Л.Я. Дислокационная структура марганцевых аустенитных сталей / Л.Я. Гольдштейн, И.В. Горынин, Н.И. Легнова, О.Г. Соколов // Металловедение. - 1969. - № 13. - С. 29-31.

Получено 25.05.09





УДК 620.187.3

М.К. Скаков

ВКГТУ им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

Э.В. Козлов

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

Б.К. Увалиев

ВКГУ им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СТАЛИ 30ХГСА ПОСЛЕ ОТЖИГА И ПРОКАТКИ

Известно [1], что сталь 30ХГСА относится к классу среднеуглеродистых легированных сталей и применяется при изготовлении ответственных сварных конструкций. Установлено [2], что в структуре стали мартенситная морфология (игольчатость) присутствует после длительного отпуска при температурах не выше 550 °C. Рост частиц углерода затруднен даже при 680 °C. Такое изменение структуры стали связано с влиянием легирующих элементов (особенно кремния). В [3] рассмотрен один из способов борьбы с обратимой отпускной хрупкостью. По мнению авторов [3], обработка высоким гидростатическим давлением провоцирует начало первой стадии распада мартенсита и происходит преимущественное формирование карбидов внутри мартенситных кристаллов. Однако, несмотря на значительное количество проведенных экспериментальных работ, до сих пор не выяснены некоторые особенности структурного состояния и фазового состава стали 30ХГСА после отпуска и деформации прокатом.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы является классификация морфологических признаков структуры, определение размеров, объемных долей α - и γ -фаз, а также карбидных фаз, мест их локализации и определение параметров тонкой структуры стали 30ХГСА в исходном (отожженном) и прокатанном состояниях.

В качестве материала исследования использовалась сталь 30ХГСА в деформированном состоянии. Химический состав стали: 0,3 % C; 0,8-1,1 % Cr; 0,8-1,1 % Mn; 0,8-1,1 % Si; 0,025 % P; 0,025 % S. Результаты по изучению микроструктуры и механических свойств данной стали представлены в работах [4, 5].

Идентификация фаз проводилась по методикам, описанным в [6, 7].

Как показали проведенные электронно-микроскопические исследования, основной составляющей (~96 %) в структуре матрицы исходного (отпущеного) состояния стали 30ХГСА является α -фаза, которая представляет собой смесь пакетного (или реечного) и пластинчатого отпущеного мартенсита (рис. 1).

При этом пакетный мартенсит составляет 0,7 от объема α -фазы, пластинчатый – 0,3.

Второй морфологической составляющей матрицы исследуемой стали является γ -фаза, и она присутствует в материале в виде остаточного аустенита, образовавшегося в результате неполного мартенситного превращения ещё при закалке. Из полученных результатов электронной микроскопии следует, что остаточный аустенит в пакетном и пластинчатом низкотемпературном мартенсите располагается по границам мартенситных кристаллов в виде длинных тонких прослоек (рис. 2).

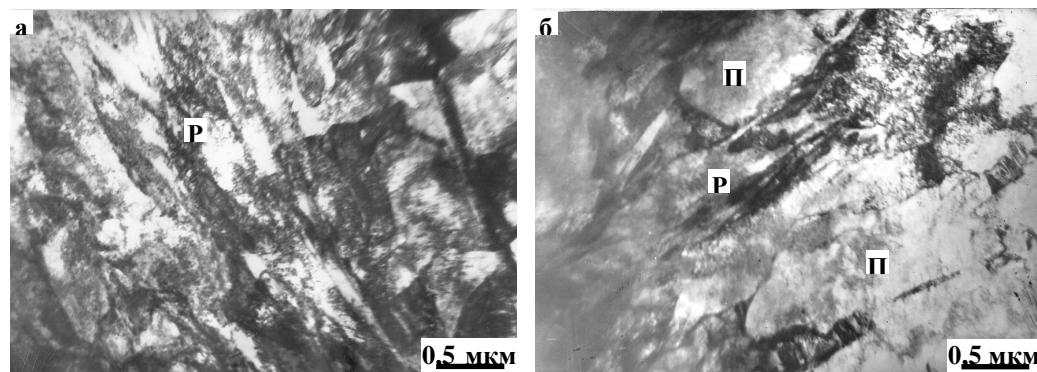


Рисунок 1 - Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры отпущененной стали 30ХГСА: а – пакетный (речный) отпущенный мартенсит (Р); б – смесь речного (Р) и пластинчатого (П) мартенсита

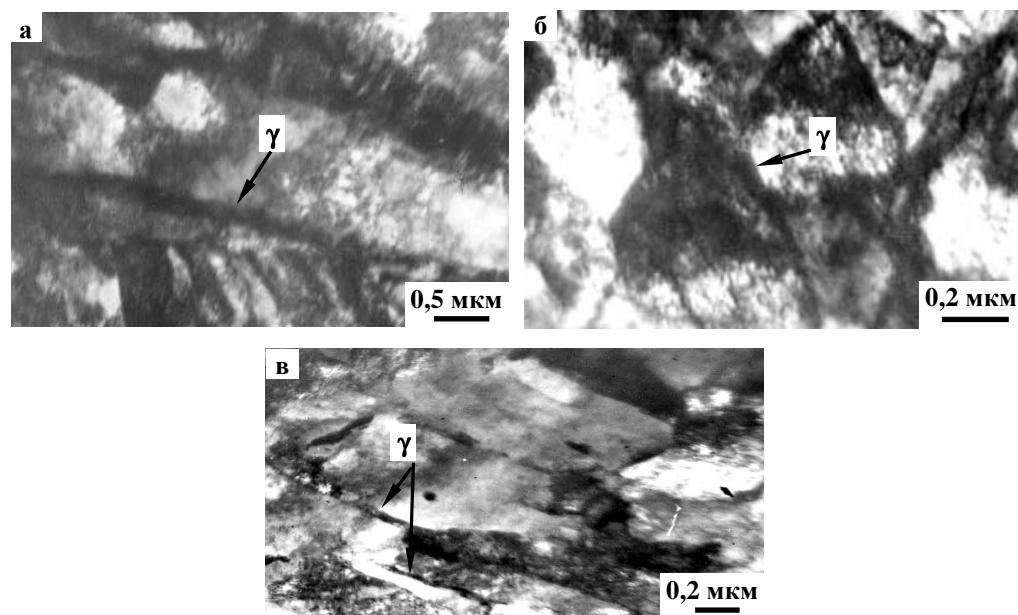


Рисунок 2 - Прослойки остаточного аустенита (γ) по границам мартенситных кристаллов: а – пластин; б – фрагментов; в – нефрагментированных реек

Объемная доля остаточного аустенита составляет ~3 %. Большая его часть (1,5 %) на-

ходится в пластинчатом мартенсите, наименьшая – во фрагментированной пакетной составляющей мартенсита (~0,5 %). В нефрагментированном пакетном мартенсите остаточный аустенит присутствует в количестве 1 %.

Карбидная фаза в структуре отпущеной стали представлена первичными карбидами типа M_6C , расположеными в материале случайным образом (рис. 3). Частицы карбида обладают сферической формой, средний диаметр частиц составляет 0,5 мкм, объемная доля – ~1 %. Цементит и вторичные специальные карбиды не обнаружены.

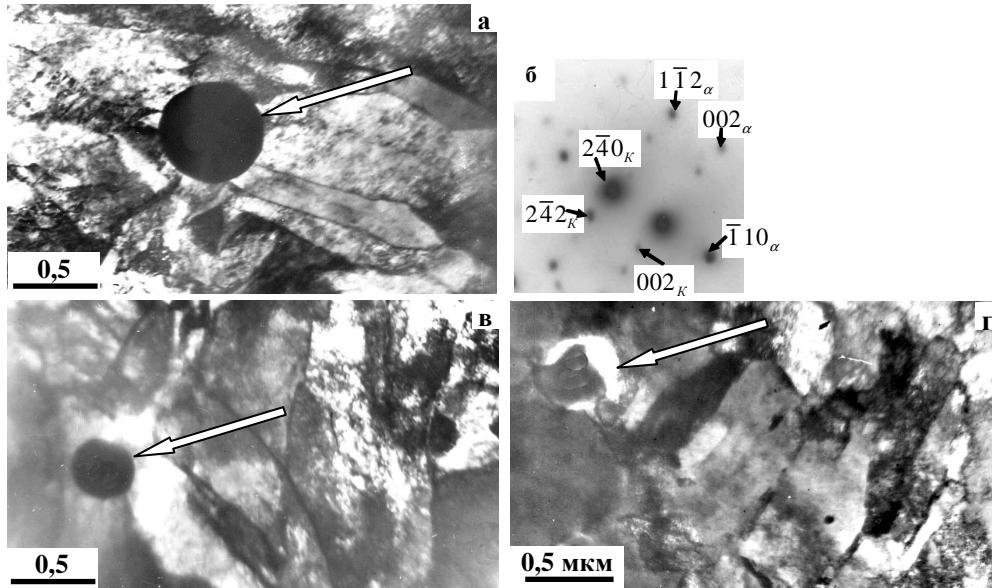


Рисунок 3 - Микроструктура отпущеной стали 30ХГСА. Стрелками отмечены частицы первично-го карбида M_6C : а, в, г – светлопольные изображения; б – индицированная микродифракционная картина, полученная с частицы на (а); присутствуют рефлексы, относящиеся к плоскости $(110)_\alpha$ (α -фазы) и $(120)_K$ (карбида M_6C)

Как видно из вышеприведенных результатов электронной микроскопии дислокационная структура в пластинчатом мартенсите и нефрагментированной части пакетного мартенсита – сетчатая, во фрагментированной части пакетного мартенсита – ячеистая. Средняя скалярная плотность дислокаций в материале составляет величину $\rho = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, причем большая часть дислокаций расположена в виде дислокационных зарядов (избыточная плотность дислокаций $\rho_\pm = 6,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$).

Термическая обработка исследуемой стали сопровождается формированием дальнодействующих полей напряжений, проявляющихся при электронно-микроскопических исследованиях тонких фольг в виде изгибных экстинкционных контуров. Примеры наблюдения изгибных контуров в отпущеной стали 30ХГСА приведены на рис. 4. Эти контуры не являются результатом деформации образца при изготовлении из него тонкой фольги, т.к. применяемая методика при изготовлении фольг практически полностью исключает внесение артефактов. Наличие экстинкционных контуров – есть результат изгиба кристаллической решетки α -матрицы [8]. При этом лишь небольшая часть кристалла находится в точном отражающем положении (контур). Чем меньше ширина контура, тем

сильнее изогнут кристалл [9]. А это означает, что амплитуда кривизны-кручения соответственно будет выше амплитуды полей напряжений σ , т.к. $\sigma \sim \chi^{-1/2}$. Используя данные размеров экстинкционных контуров, можно рассчитать амплитуду кривизны-кручения кристаллической решетки исследуемой стали 30ХГСА ($\chi = \frac{\partial \varphi}{\partial l} = 1575 \text{ см}^{-1}$) и, соответственно, величину избыточной плотности дислокаций ρ_{\pm} ($\rho_{\pm} = \frac{\chi}{b} = 6,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$). Расчеты показывают, что величина напряжения сдвига оказалась равной 530 МПа, моментных напряжений – 500 МПа.

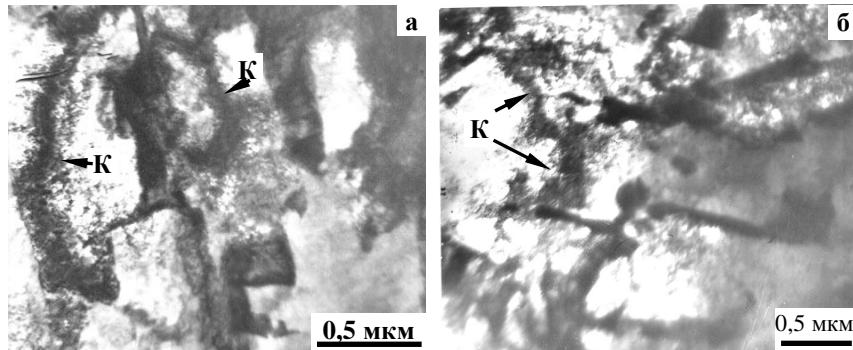


Рисунок 4 - Экстинкционные контуры (К) в отпущененной стали 30ХГСА

Перераспределение атомов углерода в исследуемой стали может протекать по следующим позициям: 1) атомы углерода могут оказаться в пересыщенном α -твердом растворе; 2) γ -твердый раствор – это второе место локализации атомов углерода; 3) в частицах карбидных фаз; 4) на дефектах кристаллической решетки (внутри вакансий, в ядрах дислокаций, в виде атмосфер Коттрелла вокруг дислокаций, на границах ячеек и субграницах [10,11]).

Объемная доля остаточного аустенита в отпущененной стали составляет 3 %, концентрация углерода в остаточном аустените исследуемой стали оказывается равной 0,015 вес. %. Объемная доля карбидной фазы в исследуемой стали составляет ~1 %. Это означает, что в карбидах сосредоточено ~0,14 вес. % углерода. Таким образом, как показывает проведенный расчет, на дефектах кристаллического строения находится почти половина углерода.

В процессе прокатки поверхностный слой образца подвергался особенно сильному деформационному и температурному воздействию. В результате этого мартенситная структура полностью разрушается, т.е. деформация приводит к изменению структуры и формы границ между рейками в пакете и поэтому диагностировать мартенситные рейки становится невозможным. При этом пластины также теряют свою характерную форму. Причиной этому служат все более интенсивно развивающиеся процессы фрагментации. Таким образом, из анизотропной структуры (мартенситные рейки и пластины) при деформации структура стали превращается в изотропную (фрагментированную).

Следует отметить, что остаточный аустенит претерпел распад, при этом на микродифракционных картинах абсолютно отсутствуют рефлексы γ -фазы.

В структуре исследуемой стали после деформации присутствуют наноразмерные фрагменты как анизотропные (длинная сторона фрагмента примерно параллельна бывшей стороне рейки), так и изотропные. Фрагментированная субструктура охватывает весь объем

материала. Объемная доля анизотропных фрагментов составляет 25 %, изотропных – 75 %.

В процессе деформации наряду с измельчением фрагментов имеет место возрастание разориентировки на их границах. Возникшая разориентированная фрагментированная структура стабилизируется третичными карбидами, образующимися в процессе деформации. Такими карбидами являются частицы цементита и специального карбида M_6C .

Локализуются эти частицы преимущественно по границам и в стыках фрагментов (рис. 5). Появление третичных карбидов свидетельствует о том, что в ходе пластической деформации произошли структурно-фазовые превращения, приведшие к образованию фрагментированной субструктурой, декорированной карбидным частицами. Подобное структурно-фазовое превращение, произошедшее в ходе активной деформации растяжением или сжатием в стали мартенситного класса, было описано в [12]. Атомы углерода для формирования третичных карбидов в ходе пластической деформации уходят с дефектов и из остаточного аустенита.

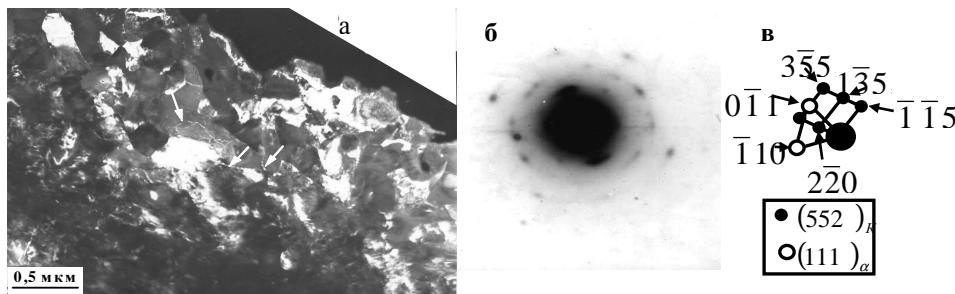


Рисунок 5 - Темнопольное изображение (а) фрагментированной субструктурой в деформированной стали 30ХГСА (стрелками указаны частицы карбидов, расположенные на границах и в стыках фрагментов), микродифракционная картина (б) и её индицированная схема (в) к (а)

Частичное наследование размера фрагментов, их ориентации субструктурой деформационного происхождения от субструктуры, возникшей в результате закалки и отпуска, свидетельствуют о том, что ранее большая часть атомов углерода находилась на субграницах последней.

На основании анализа полученных результатов электронно-микроскопических исследований тонкой структуры стали 30ХГСА после деформации прокатом можно сделать следующие выводы:

- основной составляющей (~96 %) в структуре матрицы исходного (отпущеного) состояния стали является α -фаза, которая представляет собой смесь пакетного (или реечно-го) и пластинчатого отпущеного мартенсита;
- остаточный аустенит в пакетном и пластинчатом низкотемпературном мартенсите располагается по границам мартенситных кристаллов в виде длинных тонких прослоек;
- на дефектах кристаллического строения находится почти половина углерода;
- в процессе прокатки остаточный аустенит претерпевает распад, мартенситная структура полностью разрушается и образуется наноразмерная ферритокарбидная смесь ($\alpha + M_6C + Fe_3C$);
- в процессе деформации прокатом наряду с измельчением фрагментов имеет место возрастание разориентировки на их границах;
- третичные карбиды (M_6C и Fe_3C) локализуются преимущественно по границам и в

стыках фрагментов.

Настоящая работа выполнена на основе долгосрочного договора о научно-техническом сотрудничестве между Восточно-Казахстанским государственным университетом им. С. Аманжолова и Томским государственным архитектурно-строительным университетом.

Список литературы

1. Справочник металлурга: В 5 т. / Под ред. А.Г. Рахштадта и В.А. Брострема. - М.: Машиностроение, 1976. - Т.2. - 717 с.
2. Янушевич З. Влияние режимов отпуска на структуру и механические свойства среднелегированной стали / З. Янушевич, З. Гулишия, В. Диордиевич и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1995. - № 11. - С. 24-25.
3. Константинова Т.Е. О возможности подавления обратимой отпускной хрупкости стали 30ХГСА при использовании высокого гидростатического давления / Т.Е. Константинова, В.С. Мациевская, В.А. Фомченко // ФИХОМ. - 1990. - № 6. - С. 140 - 141.
4. Скаков М.К. Изменение микроструктуры и механических свойств многослойных сварных соединений из стали 30ХГСА / М.К. Скаков, Б.К. Увалиев, Д.А. Чинахов и др. // Изв. ТПУ. - Т. 313. - № 2. - С. 119-122.
5. Скаков М.К. Микроструктура и микротвердость многослойных сварных соединений стали 30ХГСА / М.К. Скаков, Б.К. Увалиев, Д.А. Чинахов, А.В. Градобоев // Вестн. НЯЦ РК, 2008. - № 2. - С. 110-114.
6. Эндрюс К. Электронограммы и их интерпретация / К. Эндрюс, Д. Дайсон, С. Кьюн. - М.: Мир, 1971. - 256 с.
7. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. - М.: Металлургия, 1973. - 584 с.
8. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш и др. - М.: Мир, 1968. - 574 с.
9. Конева Н.А. Эволюция дислокационной структуры и стадии пластического течения поликристаллического железо-никелевого сплава / Н.А. Конева. Л.В. Лычагин. С.П. Жуковский // ФММ, 1985. - Т.60. - № 1. - С. 171-179.
10. Могутнов Б.М. Термодинамика железоуглеродистых сплавов
лин, Л.М. Шварцман. - М.: Металлургия, 1972. - 323 с.
11. Белоус М.В. Превращения при отпуске стали / М.В. Белоус
сильева. - М.: Металлургия, 1973. - 232 с.
12. Козлов Э.В. Фрагментированная субструктура, формирующаяся / Э.В. Козлов, Н.А. Попова, Н.А. Конева // Изв 2004. - Т. 68. - № 10. - С. 1419-1427.

ПО СТРАНИЦАМ



Получено 25.05.09

РЕЗИНА ИЗ МЕТАЛЛА

Новый материал для промышленных виброгасителей создали специалисты Исследовательского центра имени академика М.В. Келдыша. Разработчики назвали его металлорезиной – она представляет собой спрессованную металлическую спираль. Энергия механических колебаний благодаря трению между проволочками спирали быстро рассеивается и превращается в теплоту.

В зависимости от давления при прессовании получается металлорезина разной пористости, то есть с разным отношением ее плотности к плотности металла спирали. Соответственно она по-разному поглощает колебания различных частот. Как показали исследования, в диапазоне 10-4000 Гц наилучшими вибропоглощающими свойствами обладает металлорезина с пористостью 0,75. Амплитуда колебаний при этом снижается в 6-10 раз.

Варьировать свойства виброгасителей можно также подбором материала спирали, толщины проволоки, нанесением покрытий.

Областей применения демпферов из металлорезины – множество. Они уже работают в опорах газопровода первомайской перекачивающей станции Мосэнерго. Ими можно оборудовать насосы, станки и т.п. Из металлорезины получаются эластичные «лежачие полицейские», снижающие ударные нагрузки на подвеску автомобилей.

«Наука и жизнь» № 4, 2008