

Эти результаты показывают, что предложенные композиции могут быть использованы в изготовлении бетонных камней с различными наполнителями.

Исследованы процессы структурообразования щелочно-минеральных вяжущих, пропитанных раствором  $\text{CaCl}_2$  и бетонов на их основе. При твердении композиции из жидкого стекла и промышленного отхода на дифрактограмме выявлены фазы – каменная соль, кальцит и гидросодалит. Присутствие  $\text{NaOH}$  в этой композиции способствует кристаллизации цеолитов типа шабазита и гмеленита, а также адуляра. При добавлении портландцемента новообразованием при твердении вяжущего является ксонотлит.

Проведены физико-химические исследования процессов твердения и структурообразования, разработанных щелочно-минеральных вяжущих и показано, что формирование структуры в этих системах зависит от химического и минералогического состава составляющих и условия их обработки. Установлено, что вяжущее свойство этих материалов непосредственно связано с образованием кристаллических гидросиликатов, гидроалюмосиликатов и гидроалюминатов при твердении. Фазами, образованными при твердении щелочно-минеральных вяжущих в потоке тепло-сухого воздуха в течение 11 часов при температуре  $105\text{--}150^\circ\text{C}$  являются: низкоосновные гидросиликаты  $\text{CSH(B)} - (\text{Na}, \text{Ca}) \text{SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , гидронефелин –  $\text{Na}_2\text{Al}_2 \text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , гидроалюмосиликаты –  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,68 \text{SiO}_2 \cdot 1,73 \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_4\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{17} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ .

Фазы, образованные при твердении щелочно-минеральных вяжущих после пропитки раствором  $\text{CaCl}_2$  в течение 1 часа при температуре  $60^\circ\text{C}$ : лабрадор –  $\text{Na}_x\text{Ca}_x\text{Al}_{1,5}\text{Si}_{2,5}\text{O}_8$ , адуляр- $(\text{Na}, \text{Ca}) \text{Al Si}_3\text{O}_8$ , ксонотлит –  $\text{Ca}_4[\text{Ca}(\text{Si}_6\text{O}_{17}) (\text{OH})_2]$ , гидросодалит- $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2,1 \text{H}_2\text{O}$ .

Фазы, образованные при твердении щелочно-минеральных вяжущих в гидротермальных условиях в течение 18 часов под давлением 0,9 МПа при температуре  $174,5^\circ\text{C}$ : Na, Ca- альбит, филлипсит  $(\text{K}_2\text{Ca}) (\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4,5\text{H}_2\text{O}$  и прегнит –  $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_2$ , Ca- гидросиликат  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot 0,3\text{H}_2\text{O}$  и Na, Ca- адуляр состава  $(\text{Na}, \text{Ca}) \text{Al Si}_3\text{O}_8$ .

Считаем, что большинство установленных, при вышеуказанных условиях, новообразований является основными факторами, влияющими на твердения материалов алюмосиликатных вяжущих.

## Список литературы

1. Naqverdiyeva T.A. Alümosilikat tərkibli sənaye tullantısı əsasında alınan qələvi-mineral yapışdırıcı materialının struktur əmələgəlmə prosesinin tədqiqi. Ekologiya və su təsərrüfatı jurnali, № 5 2009, S.5-9.

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ С9%Cr

Дудова Н. Р., Кайбышев Р. О.

*Белгородский государственный университет, г. Белгород, Россия*  
[dudova@bsu.edu.ru](mailto:dudova@bsu.edu.ru)

### Введение

При разработке мартенситных высокохромистых сталей нового поколения для энергоблоков, работающих при сверхкритических параметрах пара, необходимо решение целого комплекса задач – от разработки химического состава на основе новых принципов легирования, отработки технологии их изготовления до получения базы данных по комплексу механических свойств [1–2]. Требуемый уровень жаропрочных

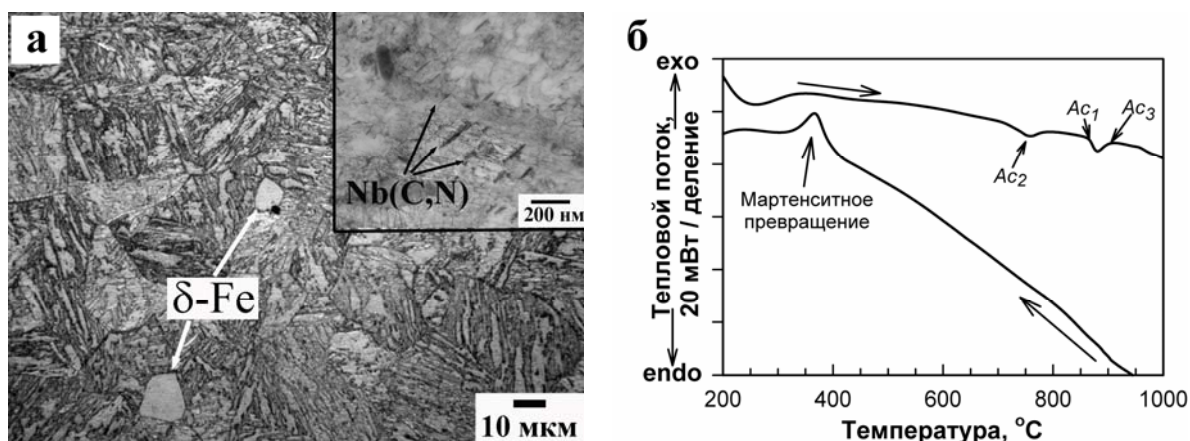
свойств сталей достигается главным образом за счет стабилизации мартенситной структуры, которая зависит от размера, распределения, устойчивости к коагуляции частиц вторых фаз [2–4]. Модификация состава разрабатываемых сталей обуславливает необходимость проведения исследований с целью выбора оптимального режима термообработки. В данной работе проводилось изучение эволюции микроструктуры при отпуске в жаропрочной мартенситной стали с 9%Cr и определение зависимости механических свойств от температуры отпуска.

### Методика проведения исследований

Сталь 10X10K3B2MФБР (0,1%С; 0,06%Si; 0,1%Mn; 10,0%Cr; 0,17%Ni; 0,7%Mo; 0,05%Nb; 0,2%V; 0,003%N; 0,008%B; 2,0%W; 3,0%Co; остальное - Fe), изготовленная ООО «Ласмет», г. Челябинск, в состоянии поставки представляла собой горячекованную полосу с размерами сечения 65×140 мм. Образцы для исследования подвергали закалке от 1060°C и отпуску в интервале температур 300-800°C в течение 3 часов. Механические испытания на растяжение проводили на плоских образцах с длиной рабочей части 12 мм и поперечным сечением 3×1,5 мм с помощью универсальной испытательной машины «Instron 5882». Температура испытания образца соответствовала температуре, при которой он был отпущен (20–800°C). Скорость деформации составляла  $2 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Твердость по Бринеллю измеряли с помощью цифрового твердомера Wolpert 3000BLD. Микроструктурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе Quanta 200, просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) была выполнена с использованием прибора SDT Q600 фирмы TA Instruments.

### Результаты исследований и их обсуждение

*Исходная микроструктура* пакетного мартенсита, сформированная в результате закалки от 1060°C, представлена на рис. 1а. Средний размер исходных аустенитных зерен (ИАЗ) составляет около 35 мкм. Присутствует около 2% зерен  $\delta$ -феррита (рис. 1а). Ширина мартенситных реек 0,2 мкм. Исследование ПЭМ вывило присутствие частиц Nb(C,N) размером около 60 нм, а также небольшой доли более крупных (около 170 нм) карбидов типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ . Плотность дислокаций составляет около  $3 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ , что обеспечивает высокие микронапряжения (0,5%). ДСК анализ позволил определить критические точки в исследуемой стали (рис. 1б).



**Рис. 1.** а – Исходная структура стали 10X10K3B2MФБР после закалки с 1060°C (оптика + ПЭМ); б – ДСК кривые стали при нагреве и охлаждении со скоростью 20 °C/мин.

Влияние температуры отпуска на механические свойства и микроструктуру стали отражено на рис. 2 и 3. Видно, что с увеличением температуры отпуска механические свойства стали изменяются немонотонно. Отпуск при небольших температурах вплоть до 450–525°C приводит к заметному упрочнению стали, что выражается в повышении твердости (рис. 2а), величины микродеформации, а также временного сопротивления (рис. 2б). Как показал анализ тонкой структуры отпущенных при 350°C и 525°C образцов, упрочнение может быть обусловлено дополнительным выделением внутри рек мелких (10–20 нм) карбидов типа  $(V,Nb)(C,N)$  и  $Me_{23}C_6$ . При температуре 525°C образование пленочных карбидов по границам ИАЗ (рис. 3–) является причиной необратимой отпускной хрупкости. Повышение температуры отпуска до 650°C приводит к выделению карбидов  $Me_{23}C_6$  в виде частиц округлой или продолговатой формы в большом количестве. Размер их составляет около 50 нм. Местами преимущественного их выделения являются как большеугловые границы (БУГ) ИАЗ, так и малоугловые границы (МУГ) рек. Отпуск мартенсита при температурах 650°C приводит к уменьшению плотности дислокаций до  $7,5 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$ , уменьшению величины микродеформации до 0,37%, временного сопротивления до 450 МПа.

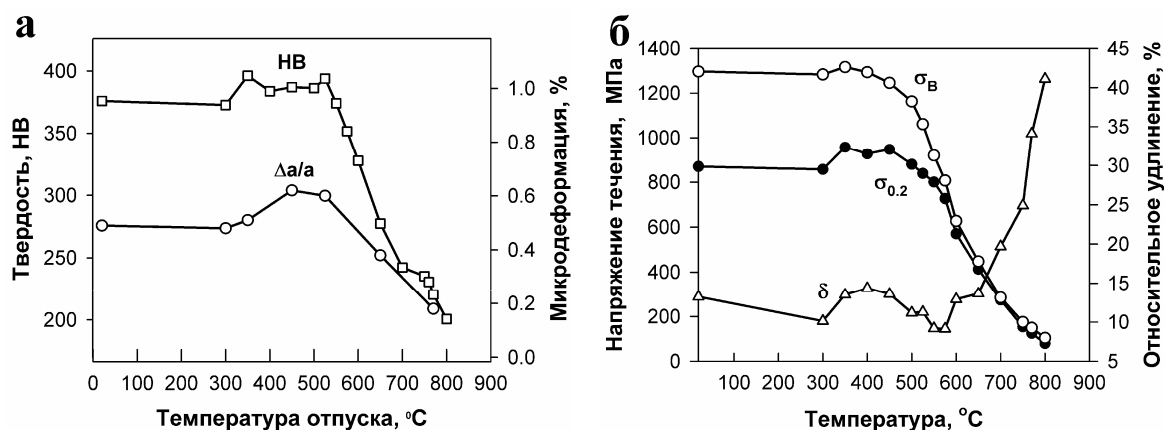


Рис. 2. а – Зависимость твердости и микродеформации от температуры отпуска; б – влияние температуры отпуска и испытания на механические свойства ( $\sigma_{0.2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$ ) стали.

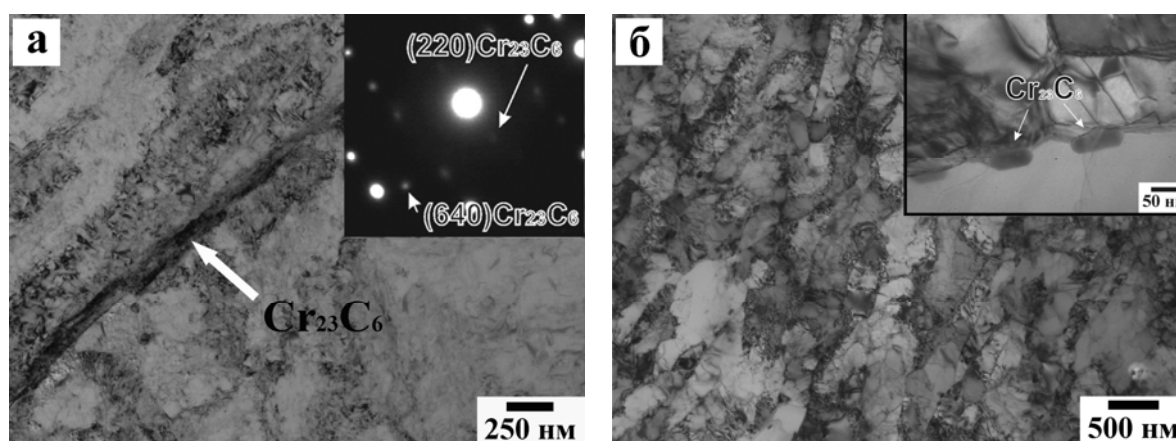


Рис. 3. Тонкая структура стали после закалки и отпуска при 525°C (а), 770°C (б).

Дальнейшее повышение температуры отпуска (770°C) обеспечивает увеличение доли карбидов до ~2%, размер их сохраняется на уровне ~ 60 нм. Необходимо отметить, что карбиды выделены не только по БУГ или МУГ, но и внутри рек. Увеличение ширины рек до 0,5 мкм сопровождается уменьшением плотности дислокаций до

$7,5 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$ . Твердость отпущенной при этой температуре стали снижается до 220 НВ, что является приемлемой величиной для обеспечения свариваемости стали.

### **Заключение**

Исследование отпуска мартенситной структуры стали при температурах 300–800°C показало следующее:

- В процессе отпуска происходит гомогенное выделение мелкодисперсных (10–20 нм) частиц типа  $\text{Me}(\text{C},\text{N})$  и  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ ;
- Необратимая отпускная хрупкость стали при  $t=525^\circ\text{C}$  обусловлена выделением пленочного карбида  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  по границам зерен;
- Высокотемпературный отпуск приводит к выделению карбидов  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  (50 нм) преимущественно по границам исходных аустенитных зерен и мартенситных реек.
- Сочетание гомогенно распределенных частиц  $\text{Me}(\text{C},\text{N})$  и выделенных по границам  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  после высокотемпературного отпуска позволит обеспечить устойчивость структуры отпущенного мартенсита при старении и ползучести. В качестве температуры отпуска исследуемой стали можно рекомендовать температуру  $770^\circ\text{C}$ .

*Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П 1095).*

### **Список литературы**

1. Vismanathan R., Henry J.F., Tanzosh J., Stanko G., Shingledecker J., Vitalis B., Purgert R., U.S. Program on Materials Technology for Ultra-Supercritical Coal Power Plants // J. Mater. Eng. Perfor., 2005, V.14, p.281 -292.
2. F. Abe, V. Taneike, K.Sawada. Alloy Design of Creep Resistant 9Cr Steel using a Dispersion of Nano-Sized Carbonitrides. // International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007, p. 3-12.
3. Maruyama K., Sawada K., Koike J.-I. Strengthening mechanisms of creep resistant tempered martensitic steel // ISIJ Int. 2001. V. 41. No. 6. p. 641-653.
4. Кайбышев Р.О., Скоробогатых В.Н., Щенкова И.А. Новые стали мартенситного класса для тепловой энергетики. Жаропрочные свойства // ФММ. 2010. Т. 109, № 2. С. 200-215.

## **ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЁНОК ПОЛИИМИДА, ОБЛУЧЁННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ**

**Старовойтов Л. Е., Ткачѳв Д. В., Гусев С. С.**

*Учреждение образования «Могилевский государственный университет им. А.А.Кулешова», г. Могилѳв, Беларусь,  
[Lbvff014@yandex.ru](mailto:Lbvff014@yandex.ru)*

В работе рассматриваются результаты применения эллипсометрии для исследования плѳнок радиационно-модифицированного полиимида.

Эллипсометрия — это неразрушающий метод исследования свойств границы раздела сред и происходящих на ней явлений по параметрам эллипса поляризации отраженного света. В процессе измерений анализируются спектральные зависимости основных эллипсометрических параметров  $\text{tg } \psi$  и  $\text{cos } \Delta$ . Первый из них описывает относительное изменение после внешнего отражения амплитуд р- и s- компонентов отраженного света, а второй возникающую разность фаз между этими же компонентами. Значения углов  $\psi$  и  $\Delta$  отраженного света связаны выражением  $\text{tg}\psi e^{i\Delta} = R_p/R_s$  которое является основным уравнением эллипсометрии [1].