

УДК 621:771.23-022.532:621.785

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

**В. М. САЛГАНИК, П. П. ПОЛЕЦКОВ, М. С. ГУЩИНА,  
Г. А. БЕРЕЖНАЯ, А. С. КУЗНЕЦОВА, П. А. СТЕКАНОВ,  
Д. Ю. АЛЕКСЕЕВ**

*Федеральное государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Магнитогорский государственный технический  
университет имени Г. И. Носова», Российская Федерация*

### **Введение**

Одним из стратегических направлений развития металлургической промышленности является активное внедрение наукоемких технологий с применением последних инновационных достижений [1]. Это диктует необходимость создания принципиально новых материалов, а также разработки сталей и листового проката, обладающего комплексом трудносочетаемых свойств [2]–[3].

К таким материалам относятся наноструктурированные высокопрочные стали, которые благодаря своим уникальным свойствам являются перспективными материалами для производства высокотехнологичной продукции нового поколения, используемой в оборонной промышленности, мосто- и автомобилестроении, крановом производстве и других наукоемких отраслях промышленности [4]–[5].

Традиционные подходы при создании материалов для сложных условий эксплуатации применимы мало: с повышением прочностных характеристик, как правило, снижается вязкость и трещиностойкость стали. В связи с этим разработка высокопрочных сталей невозможна без использования нанотехнологий, позволяющих обеспечивать требуемые свойства материала за счет управления формированием структуры на наноуровне [6]. Благодаря строго выверенному химическому составу и жестко регламентированным режимам термообработки удается последовательно измельчить структуру стали вплоть до наноуровня [7]–[9].

Цель исследования – разработка технологии для получения наноструктурированного высокопрочного листового проката с уникальным комплексом механических свойств: прочность 700–2000 Н/мм<sup>2</sup>, твердость свыше 280 НВ, удлинение не менее 8 %.

### **Методика исследования**

Проведено исследование влияния температуры закалки и отпуска на механические свойства такого проката с использованием оборудования, имитирующего реальные процессы производства стали и проката ООО «Термодеформ-МГТУ» [10]:

- плавильная печь с двумя плавильными узлами для выплавки образцов материала;
- камерная печь для нагрева образцов перед последующей обработкой;
- гидравлический пресс для горячей и холодной деформации;
- листовой стан 500 горячей и холодной деформации;

- установка контролируемого охлаждения для ускоренного охлаждения, а также для различных видов термической обработки;
- оборудование для подготовки образцов.

Для этого предварительно были выплавлены слитки из низкоуглеродистой стали с системой легирования Cr–Ni–Mo–V следующего химического состава (см. таблицу).

#### Химический состав экспериментальных сталей

Массовая доля элементов, %, не более или в диапазоне									C <sub>э</sub> , % не более
C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cu	Прочие	
0,30	0,1–0,3	0,7–1,0	0,010	0,005	0,3–0,4	0,8–1,2	0,1–0,2	Cr, V, Nb, Ti, В	0,69

Примечание. Углеродный эквивалент  $C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$ .

Обжатие слитков производили на прессе (моделирование черновой прокатки) и на реверсивном стане горячей прокатки 500 «ДУО» (чистовая прокатка). Предварительно слитки были нагреты до температуры 1200 °С, температура окончания обжатия составляла от 850 до 950 °С. Слитки прокатывали до толщины 6 мм. Полученные раскаты охлаждали на воздухе.

Нагрев под закалку осуществляли в диапазоне температур от 850 до 1040 °С, последующий отпуск – в диапазоне температур 200–600 °С. После термической обработки проводили испытания на твердость и ударный изгиб.

Испытание на твердость HRC проводили в соответствии с ГОСТ 9013, испытание на твердость HBW проводилось в соответствии с ГОСТ 9012, испытания на ударный изгиб образцов с V-образным надрезом проводили при температуре –40 °С в соответствии с ГОСТ 9454.

Влияние температуры закалки на твердость высокопрочного листового проката представлено в виде графиков (рис. 1).

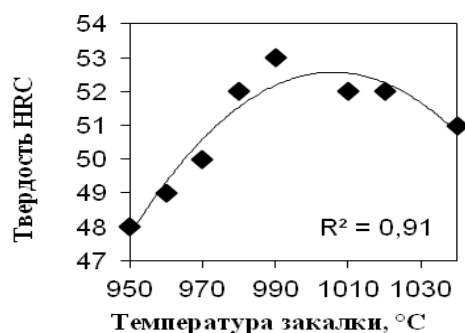
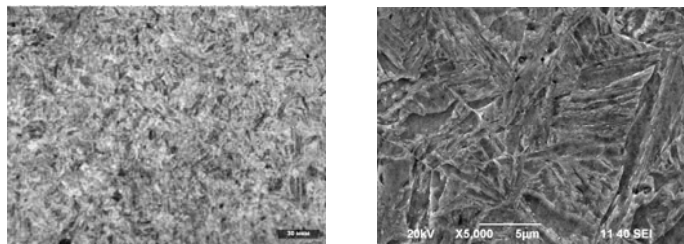


Рис. 1. Влияние температуры закалки на твердость наноструктурированного высокопрочного листового проката из сталей на основе системы легирования Cr–Ni–Mo–V

По результатам проведенного эксперимента сделали вывод о том, что для достижения максимальной твердости оптимальная температура нагрева под закалку исследуемой стали находится в диапазоне 980–1020 °С. При таком нагреве получают структуру аустенита, а в результате охлаждения со скоростью выше критической – мартенсита. Балл мартенсита изменяется в диапазоне от 4 до 7 (рис. 2).



а) б)

Рис. 2. Микроструктура исследуемых образцов высокопрочной Cr-Ni-Mo-V-стали после закалки: а – ×500; б – ×5000

Результаты испытаний на ударный изгиб (рис. 3) свидетельствуют о том, что с повышением температуры закалки вязкостные свойства высокопрочных Cr-Ni-Mo-V-сталей ухудшаются.

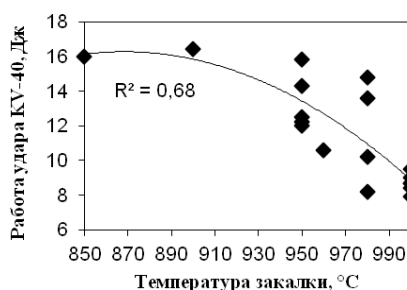


Рис. 3. Зависимость работы удара KV<sup>-40</sup> от температуры закалки высокопрочной Cr-Ni-Mo-V-стали

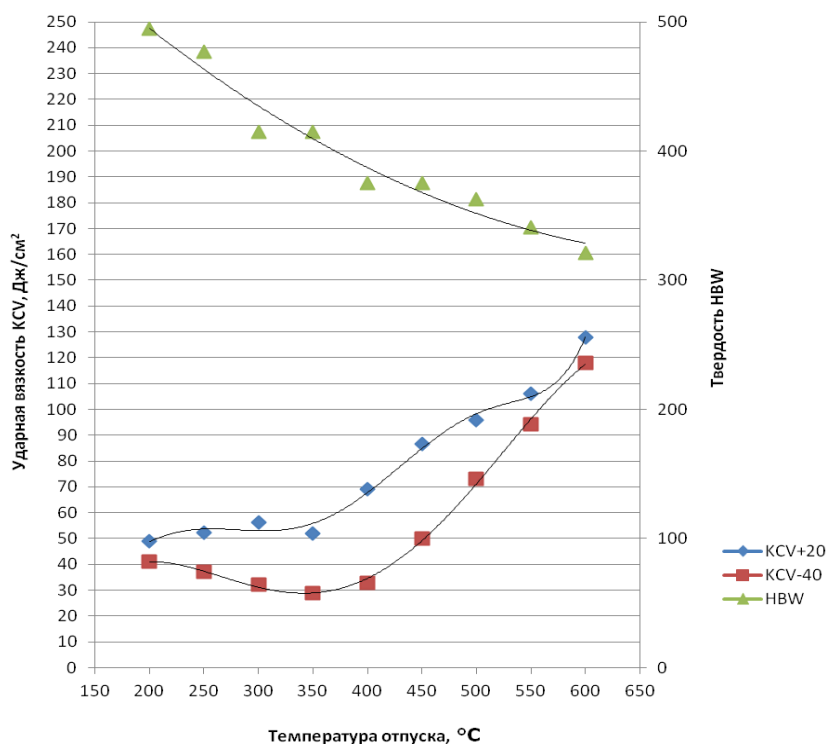


Рис. 4. Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной низколегированной стали с 0,30 % С

Далее выполнены исследования влияния отпуска на твердость и ударную вязкость высокопрочной низколегированной стали с химическим составом в соответствии с таблицей (рис. 4).

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что повышение температуры отпуска с 200 до 600 °С снижает твердость стали на 180 НВ. Также по графику, приведенному на рис. 4, видно, что при отпуске в температурном интервале 250–400 °С развивается необратимая отпускная хрупкость. Ударная вязкость закаленной стали после отпуска в этом интервале меньше, чем после отпуска ниже 250 °С. Следовательно «средний» отпуск для наноструктурированной высокопрочной стали не рекомендуется.

### Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- 1) для достижения максимальной твердости Cr–Ni–Mo–V-стали оптимальная температура закалки находится в диапазоне 980–1020 °С;
- 2) при повышении температуры отпуска высокопрочного наноструктурированного листового проката от 200 до 600 °С происходит снижение твердости на 180 НВ.

*Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 02.G25.31.0105).*

### Литература

1. Глинер, Р. Е. Разработки в области производства высокопрочной листовой стали в Швеции (сталь Domex, Docol, AHSS) / Р. Е. Глинер // Пр-во проката. – 2009. – № 10. – С. 11–18.
2. Основные виды и области применения стратегического высокопрочного листового проката / М. В. Чукин [и др.] // Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2014. – № 4. – С. 41–44.
3. Анализ технических требований, предъявляемых к наноструктурированному высокопрочному листовому прокату / М. В. Чукин [и др.] // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2014. – № 2. – С. 19–28.
4. Ulewicz, R. Structure and mechanical properties of fine-grained steels / R. Ulewicz, M. Mazur, O. Bokuvka // Transportation Engineering. – 2013. – Vol. 41/2. – P. 111–115.
5. Meyer, L. Werner. Modern high strength low alloyed steels / L. Werner Meyer, F. Pursche // Proceedings of the 1st International Conference about Recent Trends in Structural Materials COMAT 2010. – 2010. – P. 13–18.
6. Влияние химического состава и параметров производства на формирование наноструктурной составляющей и комплекса свойств высокопрочных низколегированных конструкционных сталей / И. Г. Родионова [и др.] // Metallurg. – 2010. – № 6. – С. 33–39.
7. Горынин, И. В. Наноструктурированные конструкционные стали – прорывное направление металлопотребляющих отраслей промышленности / И. В. Горынин, В. А. Малышевский, Е. И. Хлусова // Инновации. – 2010. – № 4. – С. 103–107.
8. Высокопрочные стали для толстых листов, труб и профилей / М. Понтремоли [и др.] // Чер. металлы. – 2006. – № 4. – С. 58–66.
9. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учеб. для высш. техн. учеб. заведений / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
10. Салганик, В. М. Научно-производственный комплекс «Термодеформ» для создания новых технологий / В. М. Салганик [и др.] // Сталь. – 2014. – № 4. – С. 104–107.

*Получено 20.03.2015 г.*