

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.785:621.771.23-022.532

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА\*

Полецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А., Алексеев Д.Ю., Набатчиков Д.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Представлены результаты комплексных исследований высокопрочных Cr-Ni-Mo-V- сталей. Показано влияние температуры нагрева под закалку и температуры отпуска на формирование структуры и механических свойств исследуемой высокопрочной низколегированной листовой стали. Определены ударная вязкость, твердость экспериментальных образцов и их изменение при различных температурах закалки и отпуска. Результаты исследований могут быть полезны, в частности, при выборе оптимальных режимов термической обработки с целью получения проката с высокими прочностными свойствами при сохранении пластичности и вязкости на достаточном уровне.

**Ключевые слова:** металлоемкость, надежность, высокопрочная сталь, физическое моделирование, закалка, отпуск, микроструктура, твердость, ударная вязкость.

### Введение

Основными потребителями высокопрочного листового металлопроката являются предприятия машиностроительного комплекса. Последний, в свою очередь, является одним из ключевых секторов экономики, уровень развития которого в значительной степени определяет состояние экономического потенциала Российской Федерации, ее конкурентоспособность на мировом рынке, а также обороноспособность государства [1–2].

Снижение металлоемкости конструкций – одна из главных задач машиностроения. Эффективное снижение веса машин и конструкций сопровождается повышением грузоподъемности и маневренности, улучшением экологичности из-за меньшего расхода топлива и уплотнения грунта, снижением себестоимости вследствие меньшего объема металла и сварочных материалов.

Реализация указанных тенденций возможна благодаря созданию специальных сталей высокой

прочности и твердости, обладающих достаточной пластичностью, ударной вязкостью [3, 4]. Наиболее простым решением является применение дополнительного легирования базовых композиций сталей. Однако использование дорогостоящих легирующих элементов существенно повышает стоимость стали, что делает применение таких материалов экономически нецелесообразным.

Современная концепция создания высокопрочных сталей заключается в микролегировании сталей в сочетании с вариацией режимов термической обработки (закалка + отпуск) для получения заданного уровня механических свойств (рис. 1) [5–6].

**Цель работы** – исследование влияния температуры закалки и отпуска на механические свойства высокопрочного листового проката.

Для этого была проведена серия лабораторных экспериментов на оборудовании, имитирующем реальные процессы производства стали и проката ООО «Термодеформ-МГТУ», и центра коллективного пользования научным оборудованием «Научно-исследовательский институт наносталей» при ФГБОУ ВПО «МГТУ», позволяющем осуществлять поиск технологических режимов производства новых высокопрочных сталей и листового проката, предназначенных для импортозамещения [7–9].

\* 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).

© Полецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А., Алексеев Д.Ю., Набатчиков Д.Г., 2015

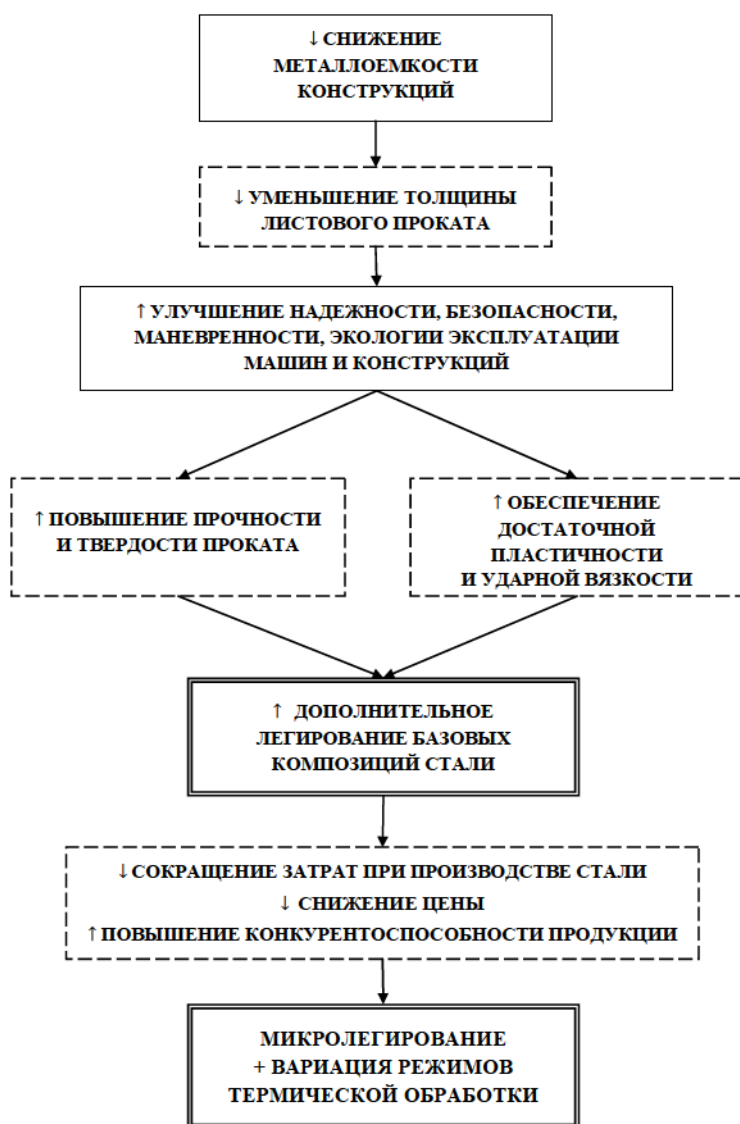


Рис. 1. Концепция создания высокопрочных сталей

### Методика проведения исследований

Предварительно были выплавлены слитки из среднеуглеродистой низколегированной стали с системой легирования Cr–Ni–Mo–V (см. таблицу).

### Химический состав экспериментальных сталей

Массовая доля элементов, %, не более							
C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Прочие
0,30	0,4	1,0	0,010	0,008	0,4	1,2	Cr, Cu, V, Nb, Ti, B

Полученные слитки нагревали в камерной печи. Далее осуществляли обжатие слитков на прессе и на реверсивном стане горячей прокатки 500 «ДУО». Слитки прокатывали до толщины 6 мм. Полученные раскаты охлаждали на воздухе.

Нагрев под закалку осуществляли в диапазоне температур от 850 до 1040°C, в качестве охлажда-

ющей среды использовали воду.

Отпуск производили с нагревом в диапазоне температур 200–600°C с последующим охлаждением на воздухе.

После термической обработки проводили испытания на твердость и ударный изгиб.

Испытание на твердость HRC проводили в соответствии с ГОСТ 9013, испытание на твердость HBW – в соответствии с ГОСТ 9012, испытания на ударный изгиб образцов с V-образным надрезом – при температуре +20 и –40°C в соответствии с ГОСТ 9454.

### Результаты исследований

Влияние температуры закалки на твердость высокопрочного листового проката представлено в виде графиков (рис. 2).

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°C [10]. 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. 3).

Результаты испытаний на ударный изгиб свидетельствуют о том, что с повышением температуры закалки от 850 до 1000°C вязкостные свойства высокопрочных Cr–Ni–Mo–V-сталей ухудшаются – работа удара уменьшается на 5–8 Дж (рис. 4).

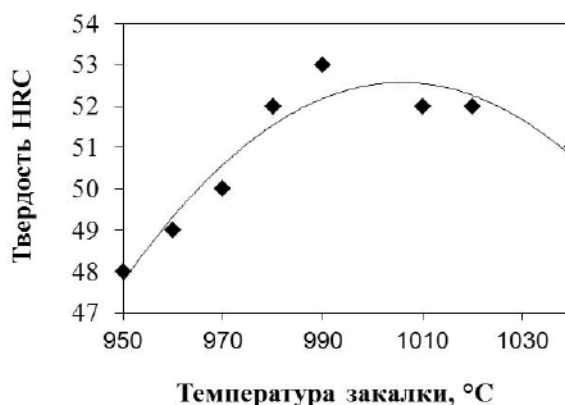


Рис. 2. Влияние температуры нагрева под закалку на твердость высокопрочного листового проката из сталей на основе системы легирования Cr–Ni–Mo–V

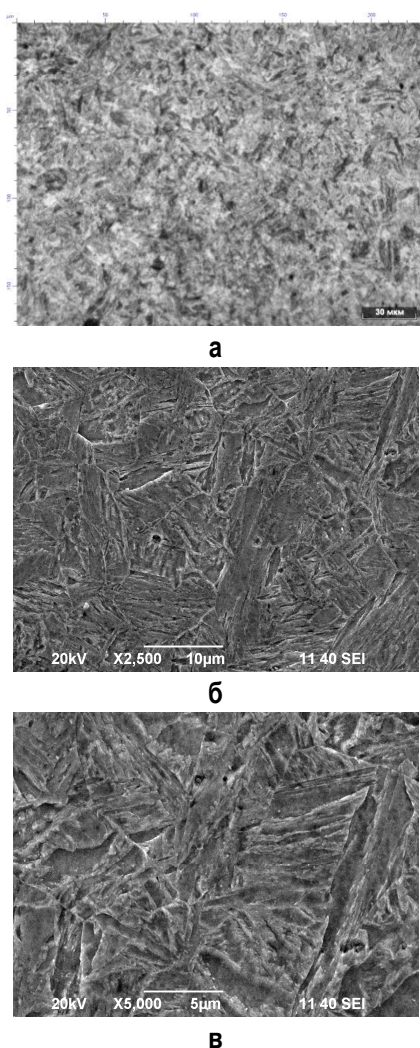


Рис. 3. Микроструктура исследуемых образцов высокопрочной Cr-Ni-Mo-V-стали после закалки: а –  $\times 500$ ; б –  $\times 2500$ ; в –  $\times 5000$

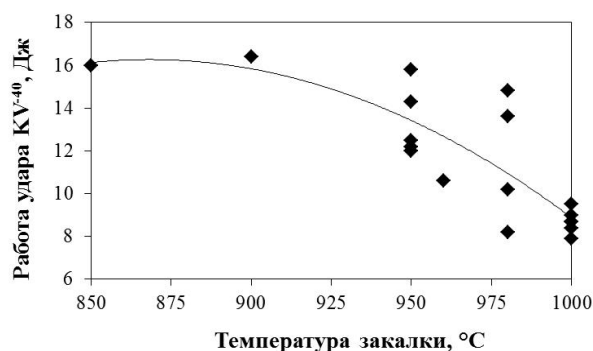


Рис. 4. Зависимость работы удара KV-40 от температуры закалки высокопрочной Cr-Ni-Mo-V-стали

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

В зависимости от температуры отпуска получены сорбитная, троосто-сорбитная, трооститная и мартенситная структуры с различными свойствами (рис. 5, 6).

Результаты исследований показали, что с повышением температуры отпуска от 200 до 600°C твердость стали снижается на 180 НВ (см. рис. 5), ударная вязкость увеличивается на 80 Дж/см<sup>2</sup>.

По графику, приведенному на рис. 6, видно, что при отпуске в температурном интервале 250–400°C развивается необратимая отпускная хрупкость. Ударная вязкость закаленной стали после отпуска в этом интервале меньше, чем после отпуска ниже 250°C. Следовательно, «средний» отпуск для высокопрочной стали не рекомендуется.

При отпуске в интервале температур 450–600°C не наблюдается провалов по ударной вязкости, которые могли бы свидетельствовать о склонности исследуемых сталей к обратимой отпускной хрупкости, что делает возможным проведение высокого отпуска в широком диапазоне температур на воздухе без резкого снижения ударной вязкости.

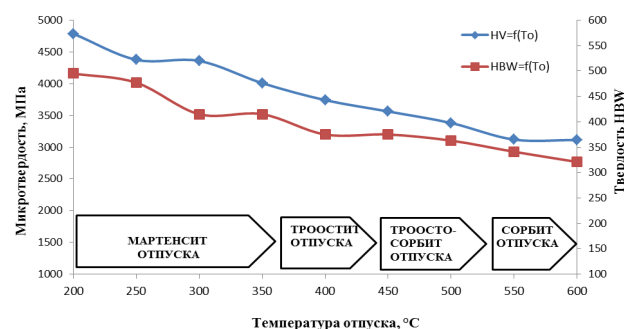


Рис. 5. Влияние температуры отпуска на микроструктуру и твердость экспериментальных образцов высокопрочной стали

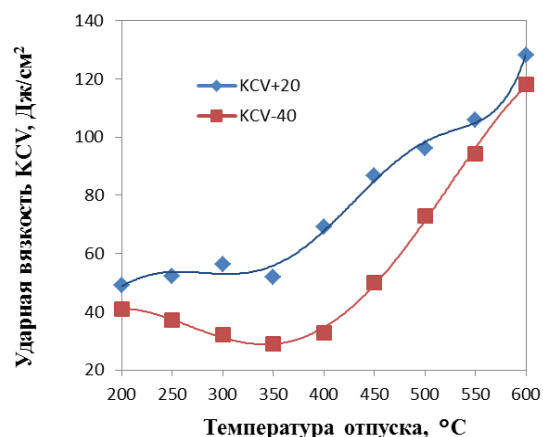


Рис. 6. Влияние температуры отпуска на ударную вязкость закаленной низколегированной Cr-Ni-Mo-V стали



### Заключение

На основании экспериментальных данных выявлены закономерности изменения твердости и ударной вязкости высокопрочных Cr-Ni-Mo-V сталей в зависимости от температуры нагрева под закалку и температуры отпуска.

Полученные данные позволяют оптимизировать процессы термической обработки высокопрочных сталей для конкретных условий применения.

### Список литературы

1. Минэкономразвития России. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://www.economy.gov.ru/mined/activity/sections/macro/prognoz>.
2. Стратегия развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года: приказ Минпромторга России от 05.05.2014 № 839. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_165502/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165502/)
3. Основные виды наноструктурированного высокопрочного листового проката и принципиальная схема его производства / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная, М.С. Гущина, С.В. Денисов, П.А. Стеканов, Д.Ю. Алексеев // XVI International Scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering». A collective monograph edited by Henryk Radomak, Jaroslaw Boryca. Series: Monografie Nr 48. Częstochowa. 2015. P. 148–151.
4. Анализ технических требований, предъявляемых к наноструктурированному высокопрочному листовому прокату / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная, М.С. Гущина, А.С. Кузнецова, Д.Ю. Алексеев // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2014. №2. С. 19–28.
5. Meyer Lothar Werner, Frank Pursche. Modern high strength low alloyed steels // Proceedings of the 1st International Conference about Recent Trends in Structural Materials COMAT 2010. 2010. P. 13–18.
6. 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 // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2015. №1. С. 27–30.
7. Научно-производственный комплекс «Термодеформ» для создания новых технологий / В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.О. Артамонова и др. // Сталь. 2014. №4. С. 104–107.
8. Физическое моделирование процессов производства горячекатаного листа с уникальным комплексом свойств / В.М. Салганик, С.В. Денисов, П.П. Полецков, П.А. Стеканов, Г.А. Бережная, Д.Ю. Алексеев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 3. С. 37–39.
9. Научная деятельность ГОУ ВПО «МГТУ» в условиях развития нанотехнологий / М.В. Чукин, В.М. Колокольцев, Г.С. Гун, В.М. Салганик, С.И. Платов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 2. С. 55–59.
10. Исследование влияния температуры нагрева при закалке на механические свойства низколегированной высокопрочной стали / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная, М.С. Гущина, Д.Ю. Алексеев // Производство проката. 2015. №5. С. 32–37.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## EFFECT OF HEAT TREATMENT CONDITIONS ON MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH ROLLED STEEL SHEET

**Poletskov Pavel Petrovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru).

**Gushchina Marina Sergeevna** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Berezhnaya Galina Andreevna** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [galina\\_1609@mail.ru](mailto:galina_1609@mail.ru).

**Alekseev Daniil Yurievich** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Nabatchikov Dmitry Gennadievich** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519)29-85-25.

**Abstract.** The article presents the results of a comprehensive study of high-strength Cr-Ni-Mo-V steels. The authors show the effect of heating temperature of quenching and tempering temperature on structuring and mechanical-property forming of high-strength low-alloy sheet steel. Impact strength and hardness of test samples and their alteration at different quenching-tempering temperatures have been determined. The results of the study can be applied in selecting optimal heat treatment conditions to obtain rolled products of

high strength at conserving ductility and viscosity at an adequate level.

**Keywords:** Specific consumption of metal, reliability, high-strength steel, physical simulation, quenching, tempering, microstructure, hardness, impact strength.

### References

1. *Minjekonomrazvitija Rossii. Prognoz dolgosrochnogo social'no-jekonomicheskogo razvitija Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda* [Ministry of Economic Development of the Russian Federation.

- Anticipated long-term social and economic development of the Russian Federation for the period until 2030]. Available at: <http://www.economy.gov.ru/minrec/activity/sections/macro/prognoz>.
2. *Strategiya razvitiya chernoy metallurgii Rossii na 2014 - 2020 gody i na perspektivu do 2030 goda: prikaz Minpromtorga Rossii ot 05.05.2014 № 839* [Development strategy of Russian ferrous metallurgy through 2014 till 2020 and for further extension up to 2030: Decree of the Ministry of Industry and Trade of Russia of 05 May 2014 No. 839]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_165502/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_165502/)
  3. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Denisov S.V., Stekanov P.A., Alekseev D.Y. Main sorts of high-strength nanostructured steel sheet and its production flow chart. XVI International Scientific conference on New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. A collective monograph edited by Henryk Radomiak, Jaroslaw Boryca. Series: Monografie Nr 48. Częstochowa, 2015, pp. 148-151.
  4. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Y. *Analiz tehniceskikh trebovaniy, predjavlyayemykh k nanostrukturirovannomu vysokoprochnomu listovomu prokату* [Analysis of technical requirements applicable to high-strength nanostructured sheet steel]. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Processing of solid and laminate materials]. 2014, no. 2, pp. 19-28.
  5. Meyer Lothar Werner, Frank Pursche. Modern high-strength low-alloyed steels. Proceedings of the 1st International Conference on Recent Trends in Structural Materials, COMAT 2010. 2010, pp. 13-18.
  6. Salganik V.M., Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A., Kuznetsova A.S., Stekanov P.A., Alekseev D.Y. Manufacturing patterns of high-strength nanostructured sheet steel. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo* [Vestnik of Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoy]. 2015, no. 1, pp. 27-30.
  7. Salganik V.M., Poletskov P.P., Artamonova M.O., Denisov S.V., Chikishev D.N. "Termodeform" research and production complex for creation of new technologies. *Stal'* [Steel]. 2014, no. 4, pp. 104-107.
  8. Salganik V.M., Denisov S.V., Poletskov P.P., Stekanov P.A., Berezhnaya G.A., Alekseev D.Y. Physical simulation of production process of hot-rolled sheet of unique properties. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 3, pp. 37-39.
  9. Chukin M.V., Kolokoltsev V.M., Gun G.S., Salganik V.M., Platonov S.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University research activities under conditions of the nanotechnology development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 2, pp. 55-59.
  10. Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Alekseev D.Y. *Issledovanie vliyaniya temperatury nagreva pri zakalke na mekhanicheskie svoystva nizkolegirovannoy vysokoprochnoy stali* [Effect of quenching temperature on mechanical properties of high-strength low-alloy sheet steel]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing]. 2015, no. 5, pp. 32-37.

Исследование влияния режимов термической обработки на механические свойства высокопрочного листового проката / Полецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А., Алексеев Д.Ю., Набатчиков Д.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 88-92.

Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A., Alekseev D.Yu., Nabatchikov D.G. Effect of heat treatment conditions on mechanical properties of high-strength rolled steel sheet. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 88-92.