

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.785:621.771.23-022.532

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-72-75

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Чукин М.В.¹, Полецков П.П.¹, Набатчиков Д.Г.¹, Гущина М.С.¹, Алексеев Д.Ю.¹, Хакимуллин К.²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

² Хосокава Колб GMBH, Бонн, Германия

Аннотация

Постановка задачи: в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого по инициативе Магнитогорского металлургического комбината с участием Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова и Термодеформ-МГТУ, разрабатывается технология производства импортозамещающего наноструктурированного листового проката с уникальным комплексом механических свойств.

Цель работы: исследование зависимости твердости и ударной вязкости от химического состава и режимов термической обработки наноструктурированного высокопрочного листового проката. **Используемые методы:** с использованием оборудования лабораторного комплекса «Термодеформ-МГТУ» проведена выплавка слитков с различными химическими композициями, которые в последующем подвергались горячей деформации и термической обработке по различным режимам. После термической обработки был осуществлен раскрой полученных раскатов для измерения твердости и проведения испытаний на ударный изгиб. Полученные результаты механических испытаний в дальнейшем подвергались статистической обработке. **Новизна** заключается в разработанных для высокопрочного листового проката математических зависимостях твердости и ударной вязкости от химического состава и режимов термической обработки. **Результат:** на основе статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения зависимости твердости и ударной вязкости от химического состава и режимов термической обработки высокопрочного листового проката. Также в процессе исследований выявлено, что отпуск высокопрочной стали системы легирования Cr-Ni-Mo-V с 0,3% C в температурном интервале 250–400°C является нежелательным, поскольку в данном диапазоне температур наблюдается развитие необратимой отпускной хрупкости. **Практическая значимость:** с использованием разработанных математических зависимостей возможно создание новых или корректировка действующих технологических режимов производства высокопрочного листового проката.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, термическая обработка, твердость, ударная вязкость, статистический анализ.

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).

Введение

В рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого по инициативе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» с участием ФГБОУ ВО

«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и ООО «Термодеформ-МГТУ» разрабатывается технология производства импортозамещающего наноструктурированного листового проката с уникальным комплексом механических свойств [1, 2]. Целью данного проекта является создание и освоение производства новых наноструктурированных высокопрочных сталей со сложным комплексом свойств.

© Чукин М.В., Полецков П.П., Набатчиков Д.Г., Гущина М.С., Алексеев Д.Ю., Хакимуллин К., 2016

Методика проведения исследований

В процессе реализации проекта в условиях лабораторного комплекса «Термодеформ-МГТУ» были проведены исследования влияния химического состава и температуры отпуска на механические свойства наноструктурированного высокопрочного листового проката системы легирования Cr-Ni-Mo-V [1].

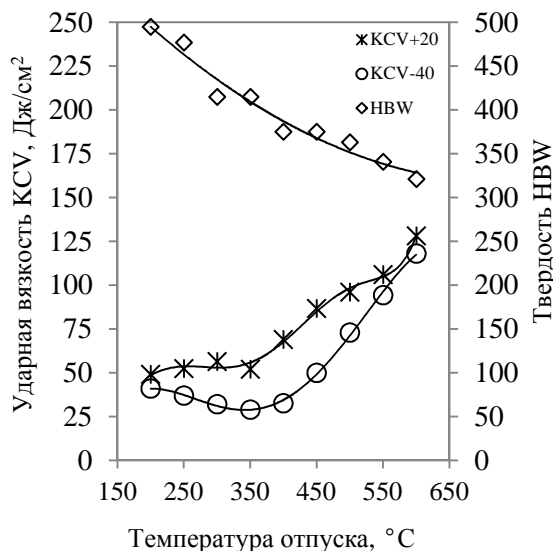
Для этого была произведена выплавка слитков с различными химическими композициями, которые в последующем нагревались в камерной печи ПКМ 3.6.2/12,5 до температуры 1200°C. Далее осуществлялось обжатие слитков с применением гидравлического пресса П6334 (имитация черновой стадии прокатки) и одноклетьевого реверсивного стана горячей прокатки 500 «ДУО» (имитация чистой стадии прокатки). Термическая обработка раскатов заключалась в закалке и последующем отпуске при температуре 200–600°C [3–5]. После термической обработки были отобраны образцы для измерения твердости и проведения испытаний на ударный изгиб. Измерение твердости проводилось по методу Бринелля с использованием твердо-сплавного шарика по ГОСТ 9012-59. Испытание на ударный изгиб проводилось по ГОСТ 9454-78 на образцах с V-образным концентратором.

Результаты исследований

В процессе исследований выявлено, что с повышением температуры отпуска с 200 до 600°C ударная вязкость стали KCV⁻⁴⁰ увеличивается на 80 Дж/см², но при этом твердость снижается на 180 НВ (табл. 1). Также при отпуске высокопрочной стали системы легирования Cr-Ni-Mo-V с 0,3% С в температурном интервале 250–400°C наблюдается одновременное падение твердости и ударной вязкости, что свидетельствует о развитии необратимой отпускной хрупкости (см. рисунок). Следовательно, «средний» отпуск для таких сталей не рекомендуется.

Таблица 1
Результаты механических испытаний высокопрочного листового проката системы легирования Cr-Ni-Mo-V с 0,3% С

Температура отпуска, °С	Механические свойства (среднее значение)	
	Твердость НВW	Ударная вязкость, Дж/см ² KCV ⁻⁴⁰
200	495	41
250	477	37
300	415	32
350	415	29
400	375	33
450	375	50
500	363	73
550	341	94
600	321	118



Влияние температуры отпуска на твердость и ударную вязкость наноструктурированного высокопрочного листового проката из стали системы легирования Cr-Ni-Mo-V с 0,30% С

Для получения зависимости механических свойств от химического состава и температуры отпуска был собран массив данных, состоящий из 60 позиций. Далее полученная выборка значений была проверена на однородность методом, рекомендованным Е.Н. Львовским [6, 7]. В случае если $\tau_{max} > \tau [0,001; n-2]$ элемент выборки признавался аномальным и исключался из массива.

После проверки выборки на однородность был проведен корреляционный анализ [9, 10]. В качестве факторов были рассмотрены следующие параметры: Al, Si, S, P, Ti, Nb, В, С_{экр} и Т_{отп}, а в качестве откликов – твердость (НВW) и ударная вязкость (KCV⁻⁴⁰).

По результатам анализа выявлено, что для отклика НВW значимыми оказались только 2 фактора – углеродный эквивалент С_{экр} и температура отпуска Т_{отп}, а для отклика KCV⁻⁴⁰ значимыми оказались 3 фактора – содержание серы S (% масс.), углеродный эквивалент С_{экр} и температура отпуска Т_{отп}.

Далее на основе полученной информации был проведен множественный регрессионный анализ по откликам НВW и KCV⁻⁴⁰, подсчитаны остатки и проверено отсутствие их автокорреляции по критерию Дарбина-Уотсона [8]. Полученные значения удовлетворяют данному критерию, следовательно, между откликами и факторами существует взаимосвязь, которую с доверительной вероятностью 95% можно аппроксимировать представленными в табл. 2 уравнениями регрессии.

Полученные в результате статистической обработки данных зависимости

Уравнение регрессии	Граничные условия			
	h , мм	$C_{\text{экв}}$	$T_{\text{отп}}$, °C	S, % масс.
$HBW = 180 + 574C + 96Mn + 115(Cr + Mo + V) + 38(Cu + Ni) - 0,38T_{\text{отп}}$	[6–10]	[0,49–0,89]	[25–590]	–
$KCV^{-40} = 76 - 2430S - 70C - 11,7Mn - 14(Cr + Mo + V) - 4,7(Cu + Ni) + 0,05T_{\text{отп}}$	[6–10]	[0,49–0,89]	[25–590]	[0,001–0,009]
$HBW = 264 + 440C + 73Mn + 88(Cr + Mo + V) + 29(Cu + Ni) - 0,35T_{\text{отп}}$	[20–30]	[0,52–0,89]	[25–590]	–
$KCV^{-40} = 136 - 2931S - 139C - 23Mn - 27,8(Cr + Mo + V) - 9,3(Cu + Ni) + 0,05T_{\text{отп}}$	[20–30]	[0,68–0,89]	[25–250]	[0,002–0,009]

Выводы

1. Отпуск в температурном интервале 250–450°C для высокопрочных сталей системы легирования Cr-Ni-Mo-V является нежелательным, поскольку в данном диапазоне температур проявляется необратимая отпускная хрупкость, что приводит к одновременному падению твердости и ударной вязкости стали.

2. Разработаны математические зависимости твердости и ударной вязкости от химического состава и режимов термической обработки, с использованием которых возможно создание новых или корректировка действующих технологических режимов производства высокопрочного листового проката.

Список литературы

1. Анализ технических требований, предъявляемых к наноструктурированному высокопрочному листовому прокату / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков и др. // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2014. № 2. С. 19–28.
2. Особенности получения наноструктурированного высокопрочного листового проката / В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.С. Гуцина и др. // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2015. №1. С. 27–30.
3. Влияние отпуска на механические свойства и микроструктуру высокопрочной низколегированной стали / Яньюевич З. и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 2. С. 23–25.
4. M.W. Tong, P.K.C. Venkatsurya, W.H. Zhou. Structure-mechanical property relationship in a high strength microalloyed steel with low yield ratio: The effect of tempering temperature. Materials Science and Engineering, 2014, vol. 609, pp. 209–216.
5. Pradipta Kumar Jena, Ponguru Senthil P., Siva Kumar K. Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel. Journal of Applied Research and Technology, 2016, vol. 14, pp. 47–53.
6. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.
7. Румянцев М.И., Ручинская Н.А. Статистические методы для обработки и анализа числовой информации, контроля и управления качеством: учеб. пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2008. 207 с.
8. Смирнов Н.В. Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1969. 211 с.
9. Минько А.А. Статистический анализ в MS Excel. М.: Изд. Дом «Вильямс», 2004. 448 с.
10. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. СПб.: Питер, 2003. 688 с.

Материал поступил в редакцию 12.09.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-72-75

MATHEMATICAL DEPENDENCES BETWEEN THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH ROLLED SHEET STEEL AND ITS CHEMICAL COMPOSITION AND HEAT TREATMENT CONDITIONS

Mikhail V. Chukin – D.Sc. (Eng.), Professor, First Vice-Rector, Vice-Rector for Research and Innovation
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: chukin@magtu.ru

Pavel P. Poletskov – D.Sc. (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-25. E-mail: pavel_poletskov@mail.ru

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

Marina S. Gushchina – Master’s Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Daniil Yu. Alekseev – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: D.U.Alekseev@mail.ru

Konstantin Khakimullin – Project Engineer

Hosokawa kolb, Bonn, Germany (FRG). E-mail: khakimullin@hosokawa-kolb.de, khakimullin.k@gmail.com

Abstract

Problem Statement: As part of the comprehensive project of creating a hi-tech production process, which is carried out by Nosov Magnitogorsk State Technical University together with Termodeform-MGTU LLC at the request of Magnitogorsk Iron and Steel Works, a process is being developed for the production of nanostructured flat rolled products having a unique combination of mechanical properties and capable of substituting similar imported products. **Objectives:** The objective is to look at how the chemical composition and the heat treatment conditions effect the hardness and the impact strength of nanostructured high-strength rolled sheet steel. **Methods Applied:** With the help of the Termodeform-MGTU laboratory facilities, a number of ingots were produced, which had various chemical compositions and which were later exposed to hot deformation and different modes of heat treatment. After the heat treatment, a number of samples were prepared from the sheets for hardness and impact testing. The results of the mechanical tests were then analysed for statistics. **Originality:** The originality of this work includes the mathematical dependences established which show how the chemical composition and the heat treatment conditions can effect the hardness and the impact strength in high-strength rolled sheet steel. **Findings:** Following the statistical analysis of the experimental data, equations were obtained that show how the chemical composition and the heat treatment conditions effect the hardness and the impact strength of high-strength rolled sheet steel. Also, it was found that the temperature range of 250 to 400 °C does not prove to be a good tempering temperature for high-strength Cr-Ni-Mo-V steel with 0.3% of carbon as it can lead to constant temper brittleness. **Practical Relevance:** The mathematical dependences established enable to create new or improve the current high-strength rolled sheet steel production processes.

Keywords: High-strength steel, heat treatment, hardness, toughness, statistical analysis.

This research was conducted as part of the major project aimed at creating a hi-tech production technology and to be implemented in cooperation with a Russian higher education institution (Contract 02.G25.31.0105) with support from the Russian Ministry of Education and Science.

References

1. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Y. Analysis of technical requirements applicable to high-strength nanostructured sheet steel. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Solid and laminate materials processing]. 2014, no. 2, pp. 19–28. (In Russ.)
2. Salganik V.M., Poletskov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A., Kuznetsova A.S., Stekanov P.A., Alekseev D.Y. Some features of producing high-strength nanostructured sheet steel. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo* [Vestnik of Sukhoy Gomel State Technical University]. 2015, no. 1, pp. 27–30. (In Russ.)
3. Yanyushevich Z. et al. The effect of tempering on the mechanical properties and microstructure of high strength low alloy steel. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical metallurgy and heat treatment of metals]. 2014, no. 2, pp. 23–25. (In Russ.)
4. M.W. Tong, P.K.C. Venkatsurya, W.H. Zhou. Structure–mechanical property relationship in a high strength microalloyed steel with low yield ratio: The effect of tempering temperature. *Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 609, pp. 209–216.
5. Pradipta Kumar Jena, Ponguru Senthil P., Siva Kumar K. Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel. *Journal of Applied Research and Technology*, 2016, vol. 14, pp. 47–53.
6. Lvovsky E.N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul: Ucheb. posobie dlya vtuzov. 2-e izd., pererab. i dop.* [Statistical methods of building empirical formulae. A guide for technical university students: 2nd ed.: revised and extended]. Moscow: Higher Sk., 1988, 239 p. (In Russ.)
7. Rumyantsev M.I., Ruchinskaya N.A. *Statisticheskie metody dlya obrabotki i analiza chislovy informatsii, kontrolya i upravleniya kachestvom* [Statistical methods for processing and analysis of numerical information and for control and quality management]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2008, 207 p. (In Russ.)
8. Smimov N.V., Dunin-Barkovskii I.V. *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy* [A course in the probability theory and mathematical statistics for technical applications]. Moscow: Nauka, 1969, 211 p. (In Russ.)
9. Minko A.A. *Statisticheskiy analiz v MS Excel* [The statistical analysis in MS Excel]. Moscow: Williams Publishing House, 2004, 448 p. (In Russ.)
10. Borovikov V. *STATISTICA. Iskusstvo analiza dannykh na kompyutere* [STATISTICA. The art on computer analysis of data]. S. Petersburg, 2003, 688 p. (In Russ.)

Received 12/09/16

Математические зависимости механических свойств от химического состава и режимов термической обработки высокопрочного листового проката / Чукин М.В., Полецков П.П., Набатчиков Д.Г., Гущина М.С., Алексеев Д.Ю., Хахимуллин К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 72–75. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-72-75

Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatchikov D.G., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu., Khakimullin K. Mathematical dependences between the mechanical properties of high-strength rolled sheet steel and its chemical composition and heat treatment conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 72–75. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-72-75