

УДК 621.785:621.771.23-022.532

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

**М. В. ЧУКИН, П. П. ПОЛЕЦКОВ, Д. Г. ЕМАЛЕЕВА,  
М. С. ГУЩИНА, Д. Ю. АЛЕКСЕЕВ**

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

### **Введение**

Высокопрочными принято называть стали, которые можно термически обрабатывать на прочность выше  $1500 \text{ Н/мм}^2$ . В Европе такие стали производятся с начала 1960-х гг., постепенно завоевывая все большую популярность в мире. В России они начали применяться с начала 1990-х гг. и со временем становятся все более востребованными. Эти стали, благодаря оптимальному химическому составу и отпуску, проведенному по особому режиму, помимо высокой прочности характеризуются высокой ударной вязкостью при пониженной температуре и хорошей свариваемостью [1], [2].

Применение высокопрочных конструкционных сталей позволяет достичь оптимизации затрат. В частности, использование более тонких, но более прочных стальных листов позволяет снизить металлоемкость конструкций. 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 [3]–[6].

В рамках выполнения комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого по инициативе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») с участием ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова»), разрабатывается инновационная [1], [7] технология производства листового проката с уникальным комплексом механических свойств: прочность  $700\text{--}2000 \text{ Н/мм}^2$ , твердость свыше 280 НВ, удлинение не менее 8 %.

В связи с этим целью работы является исследование влияния температуры отпуска высокопрочного листового проката на его механические свойства.

### **Методика проведения исследований**

В ходе исследований в условиях лабораторного комплекса ООО «Термодеформ-МГТУ» были проведены исследования влияния температуры отпуска на механические свойства высокопрочного листового проката из среднеуглеродистой низколегированной Cr–Ni–Mo–V стали (табл. 1).

## Химический состав исследуемой стали

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

Технологическая операция отпуска заключается в нагреве закаленной стали до температур ниже  $A_{c1}$ , выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью [7]. Отпуск полностью или частично устраняет внутренние напряжения, возникающие при закалке. Температура отпуска выбирается исходя из значений твердости, предусмотренной техническими условиями [8], [9]. При этом температура отпуска также должна обеспечивать возможность получения оптимального сочетания прочности и пластичности [3], [4], [10], [11].

Выплавленные слитки нагревали в камерной печи ПКМ 3.6.2/12,5 до температуры 1200 °С. Далее осуществляли обжатие слитков с применением гидравлического пресса П6334 (имитация черновой стадии прокатки) и на одноклетьевом реверсивном стане горячей прокатки 500 «ДУО» (имитация чистовой стадии прокатки). Температура окончания обжатия составляла от 850 до 950 °С. Слитки прокатывали до толщины 8 мм. Полученные раскаты охлаждали на воздухе.

Термическая обработка раскатов заключалась в закалке на мартенсит с последующим отпуском – процесс, включающий нагрев стали до температуры выше  $A_{c3}$  на 30–50 °С, выдержку при этой температуре в течение 20 мин с последующим охлаждением в воде со скоростью 40 °С/с, затем нагрев закаленной стали до температуры 200–600 °С, выдержка при этой температуре в течение 40 мин с последующим охлаждением на воздухе.

## Результаты исследований

После термической обработки были отобраны образцы для измерения твердости и проведения испытаний на ударный изгиб. Измерение твердости проводилось по методу Бринелля с применением шарика из твердого сплава диаметром 10,0 мм под действием усилия  $F = 29430$  Н (3000 кгс) по ГОСТ 9012–59. Испытание на ударный изгиб проводилось по ГОСТ 9454–78 на трех поперечных образцах с V-образным концентратором типа 13 (ударную вязкость определяли как среднее из трех значений).

Значения прочности определяли косвенным методом – перерасчетом по уравнению [12]:

$$\sigma_b = 1,095 \cdot \text{HBW}^{1,1791}.$$

Влияние температуры отпуска на прочность, твердость и ударную вязкость проката представлено графически (рис. 1, 2).

В процессе исследований выявлено, что с повышением температуры отпуска с 200 до 600 °С ударная вязкость стали  $KCV^{40}$  увеличивается на 80 Дж/см<sup>2</sup>, но при этом твердость снижается на 180 НВ (рис. 1). Также при отпуске высокопрочной стали системы легирования Cr–Ni–Mo–V с 0,3 % С в температурном интервале 250–400 °С наблюдается одновременное падение твердости и ударной вязкости, что свидетельствует о развитии необратимой отпускной хрупкости.

Для получения зависимости механических свойств от химического состава и температуры отпуска был собран массив данных, состоящий из 60 позиций.

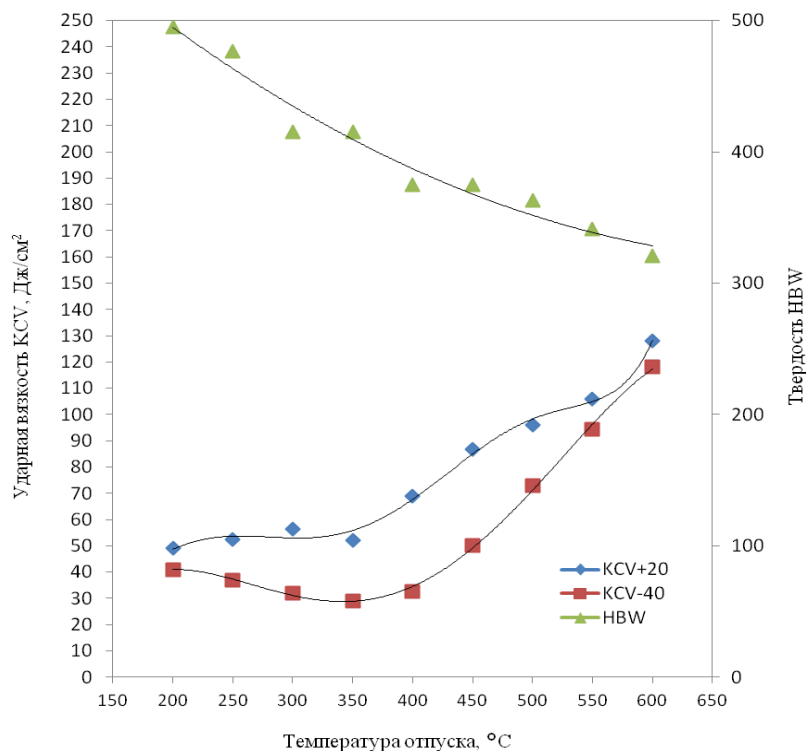


Рис. 1. Влияние температуры отпуска на твердость и ударную вязкость среднеуглеродистой низколегированной Cr–Ni–Mo–V стали

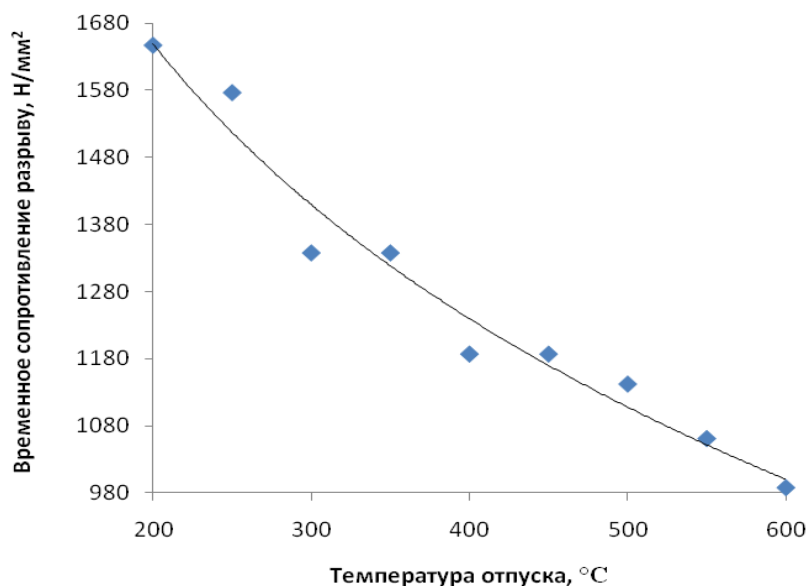


Рис. 2. Влияние температуры отпуска на прочность среднеуглеродистой низколегированной Cr–Ni–Mo–V стали

Изучение закономерностей всякой случайной величины\* возможно только по выборке значений из ее генеральной совокупности. Поэтому для получения достоверных значений параметров закона распределения прежде всего необходимо, чтобы

\*Случайная величина – это переменная, принимающая в результате то или иное числовое значение в зависимости от случайного исхода испытания [4]. Другими словами, случайная величина рассматривается как функция, аргументом которой служит элементарное случайное событие поля испытаний.

выборка не содержала грубых погрешностей (значений, которые для данной случайной величины не характерны). Ошибочные значения в дальнейшем анализе искажают информацию об исследуемом явлении. Поэтому перед тем как использовать полученные данные для каких-либо выводов, необходимо исследовать их на наличие грубых погрешностей. На основании изложенного полученная выборка значений была проверена на однородность методом, рекомендованным Е. Н. Львовским.

Далее, руководствуясь физикой процесса термомеханической обработки металла и общеизвестными данными о значительном влиянии конечной толщины листового проката на его свойства (микроструктура, фазовый состав, форма и размеры зерен и др.), разделили полученную таблицу на две части: первая часть – массив данных для толщины 6–10 мм включительно, вторая часть – массив данных для толщины 20–30 мм включительно. Дальнейшую обработку числовых данных и поиск математических зависимостей проводили для двух указанных групп, скомпонованных исходя из конечной толщины готового проката. В случае, если отпуск образцов не производился, температура отпуска принималась равной комнатной, т. е. 25 °С.

После проверки выборки на однородность был проведен корреляционный анализ. В качестве факторов были рассмотрены следующие параметры: Al, Si, S, P, Ti, Nb, V,  $C_{\text{экв}}$  и  $T_{\text{отп}}$ , а в качестве откликов – твердость (HBW) и ударная вязкость ( $KCV^{40}$ ).

По результатам анализа выявлено, что для отклика HBW значимыми оказались только 2 фактора – углеродный эквивалент  $C_{\text{экв}}$  и температура отпуска  $T_{\text{отп}}$ , а для отклика  $KCV^{40}$  значимыми оказались 3 фактора – содержание серы S (мас. %), углеродный эквивалент  $C_{\text{экв}}$  и температура отпуска  $T_{\text{отп}}$ .

Далее на основе полученной информации был проведен множественный регрессионный анализ по откликам HBW и  $KCV^{40}$ , подсчитаны остатки и проверено отсутствие их автокорреляции по критерию Дарбина–Уотсона. 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.

Таблица 2

**Полученные в результате статистической обработки данных зависимости**

Формула
$HBW = 180 + 574C + 96Mn + 115(Cr + Mo + V) + 38(Cu + Ni) - 0,38T_{\text{отп}}$
$KCV^{40} = 76 - 2430S - 70C - 11,7Mn - 14(Cr + Mo + V) - 4,7(Cu + Ni) + 0,05T_{\text{отп}}$
$HBW = 264 + 440C + 73Mn + 88(Cr + Mo + V) + 29(Cu + Ni) - 0,35T_{\text{отп}}$
$KCV^{40} = 136 - 2931S - 139C - 23Mn - 27,8(Cr + Mo + V) - 9,3(Cu + Ni) + 0,05T_{\text{отп}}$

Важным условием дальнейшего использования полученных зависимостей является область их возможного применения (табл. 3). Она определяется минимальным и максимальным значениями влияющих факторов. Однако применение указанных формул возможно и для более широких диапазонов варьирования указанных факторов, но в этом случае необходимо помнить о снижении уровня доверительной вероятности производимых расчетов.

## Область применения полученных зависимостей

Условия применимости			
$h$ , мм	$C_{\text{экв}}$	$T_{\text{отп}}$ , °С	$S$ (мас. %)
[6–10]	[0,49–0,89]	[25–590]	–
[6–10]	[0,49–0,89]	[400–590]	[0,001–0,009]
[20–30]	[0,52–0,89]	[25–590]	–
[20–30]	[0,68–0,89]	[400–590]	[0,002–0,009]

**Заключение**

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. На основании экспериментальных данных выявлены закономерности изменения твердости и ударной вязкости среднеуглеродистых низколегированных сталей Cr–Ni–Mo–V в зависимости от температуры отпуска.

Определили, что ударная вязкость KCV<sup>40</sup> закаленной стали после отпуска в интервале 250–400 °С меньше, чем после отпуска при температурах ниже 250 °С, что свидетельствует о развитии необратимой отпускной хрупкости.

Легирующие элементы, за исключением кремния, не влияют существенно на развитие необратимой отпускной хрупкости [13]. Кремний сдвигает интервал развития хрупкости в область более высоких температур отпуска 350–450 °С. Высокотемпературная термомеханическая обработка уменьшает склонность к отпускной хрупкости. На практике для исключения охрупчивания стали избегают проведения отпуска в области опасных температур.

При отпуске в интервале температур 450–600 °С 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.

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

2. Разработаны математические зависимости, с использованием которых возможно вновь проектировать и (или) корректировать имеющиеся технологические режимы производства высокопрочного листового проката, а также подбирать и (или) изменять химические композиции высокопрочных сталей для достижения необходимых требований к готовому прокату. Область применения полученных зависимостей вводит необходимые ограничения и позволяет обосновано принимать решения по их использованию в тех или иных случаях.

*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. Основные виды наноструктурированного высокопрочного листового проката и принципиальная схема его производства / М. В. Чукин [и др.] // XVI International Scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering». A collective monograph edited by Henryk Radomiak, Jarosław Boryca. – Częstochowa, 2015. – № 48. – P. 148–151.

2. Lothar Werner Meyer, Frank Pursche. Modern high strength low alloyed steels // Proceedings of the 1st International Conference about Recent Trends in Structural Materials COMAT 2010, Pilsen, Czech Republic. – 2010. – 25–26th November. – P. 13–18.
3. Barényi Igor, Híreš Ondrej, Lipták Peter. Changes in mechanical properties of armoured UHSLA steel ARMOX 500 after over tempering // Problems of mechatronics. Armament, aviation, safety engineering. – 2013. – № 4 (14). – С. 7–14.
4. Robert Ulewicz, Magdalena Mazur, Otakar Bokuvka. Structure and mechanical properties of fine-grained steels // Transportation Engineering. – 2013. – № 41/2. – P. 111–115.
5. Nahme H., Lach E. Dynamic behavior of high strength armor steels // J. Phys. IV France 07. – 1997. – P. 373–378.
6. Bryson W. E. Heat treatment, selection, and application of tool steels // Munich: Hanser. – 2009. – 240 p.
7. Влияние температуры закалки на механические свойства наноструктурированного высокопрочного листового проката / М. В. Чукин [и др.] // XVI International Scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering». A collective monograph edited by Henryk Radoimiak, Jarosław Boryca. – Częstochowa, 2015. – № 48. – P. 152–156.
8. Tabor D. The Hardness of metals // Oxford: Clarendon press. – 1951. – 171 p.
9. Brinell J.A. II Congres Jnt des Methodes d'essai. – Paris, 1900. – 176 p.
10. Barényi Igor. Secondary processing of UHSLA ARMOX 500 steel with heat based technologies // University Review. – 2012. – Vol. 6, № 2. – P. 6–9.
11. Nilsson Martin. Constitutive model for Armox 500T and Armox 600T at low and medium strain rates. – 2003. – 76 p.
12. Экспериментальное исследование взаимосвязи механических характеристик и твердости высокопрочных сталей / М. В. Чукин [и др.] // Естеств. и техн. науки. – 2016. – № 8. – С. 56–61.
13. Гольдштейн, М. И. Специальные стали : учеб. для вузов / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – М. : Metallurgia, 1985. – 408 с.

*Получено 15.11.2016 г.*