

УДК 669.15.075.8

А. В. Алифанов¹, Г. П. Горецкий², В. В. Цуран¹, И. А. Богданович¹, О. А. Толкачева²

¹Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

²Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 267 60 10, priemnaya@phti.by

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РУБИЛЬНЫХ НОЖЕЙ**

Для проведения исследований выбраны марки сталей, наиболее часто применяющиеся или по своим свойствам пригодные для изготовления рубильных ножей, в частности, X12, X12MF, 5XHM, 6XB2C, U8A, 9XC, XVG. Исследования структуры и твердости этих сталей показали, что у высокоуглеродистых сталей после высокотемпературной термомеханической обработки образуется мартенситная основа с большим количеством карбидов, что говорит о высокой твердости и малой пластичности большинства из рассматриваемых сталей, что делает их малоприспособными для изготовления рубильных ножей, работающих в условиях ударных нагрузок. Для изготовления рубильных ножей можно рекомендовать стали 6XB2C, 5XHM и XVG, имеющие после высокотемпературной термомеханической обработки мелкодисперсную однородную структуру, которая обеспечивает как высокую твердость, так и достаточную пластичность.

Ключевые слова: рубильные ножи; марка стали; твердость; пластичность; высокотемпературная термомеханическая обработка.

Рис. 1. Табл. 3. Библиогр.: 5 назв.

A. V. Alifanov¹, G. P. Goretsky², V. V. Tsuran¹, I. A. Bogdanovich¹, O. A. Tolkacheva²

¹Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voikov St., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

²State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 10 Kuprevich St., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 60 10, priemnaya@phti.by

**THE RESEARCH OF THE INFLUENCE OF AUSFORMING ON THE STRUCTURE
AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS APPLIED
FOR MANUFACTURING CHIPPING KNIVES**

To conduct the research, steel grades were selected that are most often used or suitable for the manufacture of chipping knives, X12, X12MF, 5XHM, 6XB2S, U8, U8A, 9XC, HVG in particular. The studies of the structure and hardness of these steels showed that, after ausforming, high-carbon steels form a martensitic base with a large amount of carbides, which indicates the high hardness and low ductility of most of the steels under consideration, which makes them unsuitable for the manufacture of chipping knives operating under shock load conditions. For the manufacture of chopping knives, 6XHV2S, 5KHNM and KHVG steels can be recommended, which, after ausforming, have a finely dispersed homogeneous structure that provides both high hardness and sufficient ductility.

Keywords: chipping knives; steel grade; hardness; ductility; ausforming.

Fig. 1. Table 3. Ref.: 5 titles.

Введение. Республика Беларусь обладает высокоразвитой деревообрабатывающей промышленностью, поэтому переработка древесных отходов имеет большое значение для страны. Из отходов такого рода изготавливают высококачественное сырье для производства целлюлозы, которая используется для изготовления бумаги, а также сырье для изготовления древесностружечных плит и топливной щепы.

Для производства разнообразной древесной щепы в Республике Беларусь используют зарубежные рубительные машины, оснащенные, соответственно, импортными рубильными ножами. В целях снижения валютных расходов Правительством Республики Беларусь поставлена задача разработать отечественную технологию и организовать производство рубильных ножей. С этой целью сотрудниками Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси и учреждения образования «Барановичский государственный университет» определен химический состав и механические свойства импортных ножей, применяемых на деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь. Затем были подобраны образцы российских сталей, близких по свойствам импортным образцам, на которых были проведены исследования по изучению влияния высокотемпературной термомеханической обработки (далее — ВТМО) на структуру и механические свойства сталей, рекомендуемых для изготовления рубильных ножей.

Для повышения прочностных свойств сталей, используемых для различных целей, часто применяют термомеханическую обработку, особенно ВТМО. Повышение механических свойств сталей под влиянием ВТМО является следствием изменения структурного состояния мартенсита или бейнита в результате появления субструктуры и дислокаций, возникающих в аустените в процессе его деформации [1].

Существенное улучшение свойств наблюдается лишь тогда, когда режим пластической деформации обеспечивает формирование в аустените развитой субструктуры в результате динамической полигонизации или динамического возврата. Такая субструктура достаточно устойчива и поэтому наследуется мартенситом или бейнитом после закалки.

При перлитном превращении зерна перлита образуются в «мягком» аустените, напряжения не возникают, и зерна перлита могут приобрести устойчивую, приближающуюся к округлой, форму.

Бейнитное превращение происходит при низкой температуре, из-за чего рост новых фаз происходит в упругой среде и устойчивые округлые конгломераты образовываться не могут, так как это создало бы большие напряжения. Поэтому внешняя форма кристаллов приспосабливается к этим условиям — зерна бейнита приобретают пластинчатую форму, и рост таких кристаллов не ведет к возникновению больших напряжений [2].

В данной работе исследовалось влияние ВТМО на структуру и механические свойства сталей, которые можно использовать для производства отечественных рубильных ножей. Для получения запланированных результатов было решено использовать закалку на бейнит с температурой закалки 200...340 °С.

Основная часть. Для проведения исследований было выбрано семь видов сталей различного состава (таблица 1) и проведено изучение влияния ВТМО на их свойства. Ниже представлена характеристика выбранных сталей, свойства которых можно повысить с помощью ВТМО.

Стали X12 и X12МФ. Относятся к сталям повышенной износостойкости. Они имеют объемную долю карбидов 15...20 %, преимущественно типа M_7C_3 . Большая объемная доля и неравномерное распределение (карбидная неоднородность) снижает прочность и ударную вязкость, являясь причиной выкрашивания рабочих частей и трещинообразования. Используются часто для изготовления рубильных ножей.

Сталь 5ХНМ. Штамповая сталь, характеризующаяся умеренной теплостойкостью и повышенной вязкостью. Используется чаще всего для изготовления молотовых штампов, контейнеров и блоков матриц горизонтально-ковочных машин. Основные требования к ним — повышенная вязкость в крупных заготовках (до 800 мм) во всех направлениях. Сохраняется уровень твердости 43...45 HRC.

Следует исследовать эту сталь на степень повышения эксплуатационных свойств после ВТМО. Эта сталь с бейнитной или бейнитно-мартенитной структурой характеризуется удовлетворительной пластичностью и вязкостью, но пониженной прочностью и теплостойкостью. Возможно, что при использовании ВТМО и получения в результате ее субструктуры удастся повысить прочностное свойство стали, в частности, при ударных нагрузках, благодаря чему эту сталь можно будет использовать для изготовления рубильных ножей.

Сталь 6ХВ2С. Предназначена для ножей холодной резки металла, резбонакатных плашек, штампов сложной формы, работающих с повышенными ударными нагрузками. Используется также для рубильных ножей.

Сталь У8А. Используется для инструмента, работающего в условиях, не вызывающих разогрева режущей кромки (топоры, стамески, пилы, кусачки и др.). Это недорогая сталь, имеющая после закалки высокую твердость и прочность, но низкую пластичность. При использовании ВТМО можно улучшить свойства стали, особенно пластичность. Ее необходимо закалывать, чтобы предотвратить перлитный распад, и желательно закалывать на нижний бейнит для повышения пластических свойств.

Сталь 9ХС. Предназначена для изготовления режущих инструментов, обладающих повышенной износостойкостью в условиях, не вызывающих значительного разогрева режущей кромки; для инструментов с повышенной прокаливаемостью и теплостойкостью: плашки, развертки, фрезы, оснащенные пластинками твердого сплава, штампы для листовой штамповки. Используется также для изготовления рубильных ножей.

Сталь ХВГ. Предназначена для изготовления режущих инструментов, обладающих повышенной износостойкостью, без значительного разогрева режущей кромки; для инструментов с малой деформируемостью при термообработке (протяжки, длинномерный инструмент). Используется также для рубильных ножей. Чтобы несколько повысить пластичность, рекомендовано закалывать инструмент на нижний бейнит при температуре приблизительно 300 °С.

Т а б л и ц а 1. — Составы исследуемых сталей

Марка стали	Легирующие элементы, масс. %										
	C	Mn	Si	Cr	P, S	Cu	Ni	W	Mo	V	Ti
X12	2,0...2,2	0,15...0,45	0,1...0,4	11,5...13,0	по 0,03	0,3	0,35	—	0,2	0,15	0,03
6ХВ2С	0,5...0,65	0,15...0,40	0,5...0,8	1,0...1,3	по 0,025	0,3	0,35	2,2...2,7	0,3	—	—
5ХНМ	0,5...0,6	0,5...0,8	0,1...0,4	0,5...0,8	по 0,03	0,3	1,4...1,8	—	0,15...0,3	—	—
9ХС	0,85...0,95	0,3...0,6	1,2...1,6	0,95...1,25	по 0,03	0,3	0,35	—	0,2	0,15	0,03
ХВГ	0,9...1,05	0,8...1,1	0,1...0,4	0,9...1,2	по 0,03	0,3	0,35	1,2...1,6	0,3	—	—
X12МФ	1,45...1,65	0,15...0,45	0,1...0,4	11,0...12,0	по 0,03	0,3	0,35	1,2...1,6	0,15...0,3	0,15...0,3	—
У8А	0,76...0,83	0,17...0,33	0,17...0,33	0,2	по 0,03	0,25	0,25	—	—	—	—

Заготовки исследуемых образцов сталей имели различную конфигурацию, поэтому они были продеформированы дважды, чтобы избежать динамической рекристаллизации при окончательном деформировании.

Предварительно заготовки были продеформированы в пруток \varnothing 15 мм и после рекристаллизации повторно — при температуре около 1 150 °С в пруток \varnothing 12 мм и закалены в масло. Окончательная деформация составляла около 30 %, что предотвращало динамическую рекристаллизацию. Процесс деформации производился на молоте (массой 400 кг) модели МА 4188.

В таблице 2 приведены значения твердости стальных образцов после ВТМО, а также представлены температурные параметры для проведения термообработок.

После ВТМО стальные образцы приобретают мартенситную или ферритную структуру, упрочненную дисперсными карбидами. В соответствии с данными таблицы 2, материал приобретает высокую твердость, что усложняет изготовление образцов для исследования механических свойств.

В соответствии со стандартом DIN 50150, по результатам определения твердости с использованием таблиц и графиков, можно с некоторой долей погрешности определить предел прочности материала [3]. Определена прочность образцов из исследуемых сталей по значениям твердости (таблица 3, столбец 5).

В Магнитогорском ГТУ имени И. И. Носова проведена работа по определению механических свойств высокопрочных сталей по твердости [4], в которой авторы показывают высокую точность при переводе твердости в показатели прочности и пластичности по формулам: $\sigma_B = 3,61 \text{ НВ} - 154,9$; $\sigma_{0,2} = 8,62 \text{ НВ}^{0,812}$; $\delta_{50} = 1,7731(\sigma_{0,2}/\sigma_B)^{-8,152}$.

По приведенным выше формулам определены значения σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ_{50} после ВТМО. Отметим, что практически все образцы сталей после ВТМО, кроме стали У8А, имеют высокие показатели твердости, равные или приближающиеся к *HRC* 60 (см. таблицу 3).

Т а б л и ц а 2. — Твердость исследуемых сталей после проведения ВТМО и температурные параметры для проведения термических обработок

Марка стали	Твердость после ВТМО, <i>HRC</i>	Температура, °С		
		Изотерма перлита*	Нагрев под закалку**	Закалка на нижний бейнит***
X12	59	700	960...980	200...250
6XB2C	57	600	880	340
5XHM	53	600	850	300
9XC	55	600	840...880	250
XBG	58	575	840	300
X12MФ	60	675	1 000...1 030	200...300
У8А	47	550	780...800	250...300

Примечание. * — температура отпуска на перлит; ** — температура закалки; *** — температура отпуска на нижний бейнит.

Т а б л и ц а 3. — Прочностные свойства исследуемых сталей после ВТМО, определенные по их твердости

Марка стали	Твердость		Прочностные свойства, МПа, %			
	<i>HRC</i>	<i>HB</i>	σ_b , до ВТМО	σ_b , после ВТМО	$\sigma_{0,2}$	δ_{50}
1	3	3	4	5	6	7
X12	59	620	2 080	2 083,3	1 595,6	15,59
6XB2C	57	605	1 950	2 029,2	1 564,2	14,79
5XHM	53	600	1 950	2 011,1	1 553,7	14,53
9XC	55	545	1 870	1 812,6	1 437,0	11,77
XBG	58	620	2 080	2 083,3	1 595,6	15,59
X12MФ	60	620	2 080	2 083,3	1 595,6	15,59
У8А	47	445	1 520	1 451,6	1 218,9	7,36

Однако проведенный ранее анализ особенностей импортных рубильных ножей показал, что ни один из этих ножей не имел твердости, приближающейся к *HRC* 60. Такие ножи не имеют достаточной вязкости, чтобы противостоять ударным нагрузкам, и быстро выйдут из строя.

Анализ представленных выше результатов исследований позволяет признать наиболее перспективными для дальнейших исследований стали 6XB2C (*HRC* 57), 5XHM (*HRC* 53), 9XC (*HRC* 55), XBG (*HRC* 58). У стали У8А, напротив, твердость оказалась слишком низкой (*HRC* 47), что ставит под сомнение ее пригодность к изготовлению рубильных ножей с применением ВТМО. Прочностные свойства образцов после ВТМО увеличились незначительно, а для стали У8А даже уменьшились.

Были изучены структуры исследуемых сталей после ВТМО (рисунок 1, *a—e*).

Изображения структуры сталей в основном получены при большом увеличении ($\times 2\,000$), так как в результате высокотемпературной деформации аустенита полученные дисперсные субструктуры, наследуемые мартенситом или бейнитом после закалки, трудно дифференцируются.

На рисунке 1, *a*, представлена структура стали X12 после ВТМО. По химическому составу она имеет повышенное содержание хрома (12 %) и углерода (1,45...1,65 %). Поэтому закалка идет из области $\gamma + k$, а за счет высокого содержания углерода мартенситное превращение снижается в область отрицательных температур. Структура стали после ВТМО имеет мартенситную основу с карбидами типа M_7C_3 и, по всей вероятности, остаточного аустенита [5]. Структура стали X12MФ практически не отличается от структуры стали X12.

Структуры сталей 6XB2C (см. рисунок 1, *b*), 5XHM (см. рисунок 1, *в*) после ВТМО представляют собой мелкодисперсный мартенсит. В образце стали 5XHM он мало похож на классический мартенсит в связи с измельчением зерен после ВТМО.

Рассмотрим структуры сталей XBG (см. рисунок 1, *г*), 9XC (см. рисунок 1, *д*) и У8А после ВТМО (см. рисунок 1, *е*). В стали XBG образуется дисперсный мартенсит, а в остальных — крупные иглы мартенсита.

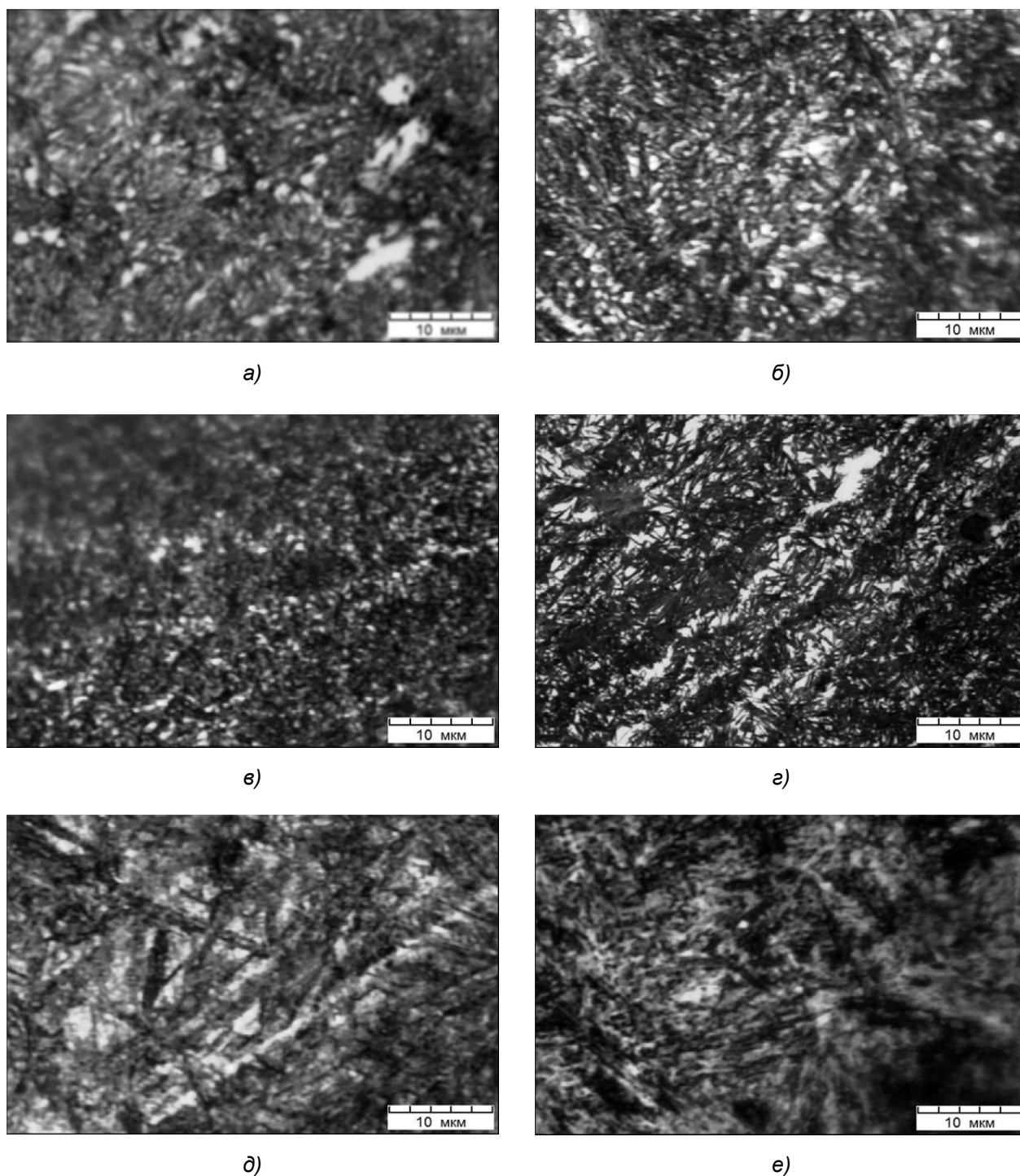


Рисунок 1. — Микроструктура образцов сталей после ВТМО: сталь X12 (а), сталь 6ХВ2С (б), сталь 5ХНМ (в), сталь ХВГ (г), сталь 9ХС (д), сталь У8А (е). × 2 000

Заключение. Анализ физико-механических свойств и структуры опытных образцов сталей, подвергнутых ВТМО, показывает, что углеродистые стали X12 и X12МФ имеют мартенситную основу с большим количеством карбидов типа M_7C_3 , что говорит о высокой твердости и малой пластичности образцов. Следовательно, эти стали нежелательно использовать для изготовления рубильных ножей, испытывающих в процессе эксплуатации значительные ударные нагрузки.

Микроструктуры сталей 9ХС и У8А содержат крупные иглы мартенсита, что также свидетельствует о недостаточной пластичности исследованных образцов.

Из рассмотренных в данной работе сталей, подвергнутых ВТМО, для изготовления рубильных ножей можно рекомендовать стали 6ХВ2С, 5ХНМ и ХВГ, имеющие мелкодисперсную однородную структуру, которая свидетельствует о рациональном сочетании твердости и пластичности для материалов исследуемого типа.

Данная научно-исследовательская работа выполнена в рамках задания 3.2.14 Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Материалы в технике».

Список цитируемых источников

1. *Бернштейн, М. Л.* Термомеханическая обработка металлов и сплавов / М. Л. Бернштейн. — М. : Металлургия, 1968. — 1172 с.
2. *Гуляев, А. П.* Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Metallurgy, 1966. — 480 с.
3. *Марковец, М. П.* Построение диаграммы истинных напряжений по твердости и технологической пробе / М. П. Марковец // Журн. техн. физики. — 1949. — Т. XIX. — Вып. 3. — С. 371—382.
4. *Чукин, М. В.* Определение механических свойств высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей по твердости / М. В. Чукин, П. П. Полецков, М. С. Гущина // Обработка сплошных и слоистых материалов. — 2016. — № 1 (44). — С. 28—35.
5. *Попова, Л. Е.* Диаграмма превращения аустенита в сталях и бета-растворах в сплавах титана / Л. Е. Попова, А. А. Попова. — М. : Metallurgy, 1991. — 503 с.

Поступила в редакцию 08.05.2020