

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

**Малыгин Б. В.**, *д.т.н., професор кафедры судовых энергетически установок Херсонской государственной морской академии;*

**Касилов О. А.**, *инженер кафедры общинженерной подготовки Херсонской государственной морской академии*

*В качестве материала для исследования выбрали сталь 60С2ХФА, (применяемую для зубил, рубильных молотков), штамповые стали для горячего деформирования, марок 35Х5ВМФС, 55ХГСНМФ, материалы для деталей холодных штампов Х, 9ХС, ДИ-31, а также опытные 7ХСМТ, 65ХЗГСВМФ, 70С2НДКМ, 140Г2Н2МС, 6Х4М2ФТ, 8Х5М2ФС. Стали обрабатывались холодом для полного распада аустенита в мартенсит. Проводилось исследование вторичной твердости сталей, обладающих этим свойством. Проводились исследования структурно-чувствительных свойств, удельного электросопротивления, намагниченности насыщения, коэрцитивной силы и твердости легированных сталей.*

**Ключевые слова:** *легированная сталь, низкотемпературная термомеханическая обработка, закалка в азоте, коэрцитивная сила, удельное электросопротивление.*

**Вступление.** В настоящее время для обеспечения высокой прочности и ударной вязкости металлообрабатывающего инструмента, а в частности штамповых ударных сталей предъявляются повышенные требования. Для обеспечения долговечности и износостойкости штампового и рубильного инструмента проведена работа по усовершенствованию материала инструмента. Получен ряд данных характеристик новых марок сталей, содержащих ценные легирующие элементы такие как хром, молибден, кобальт, ванадий, никель. Получен ряд результатов исследования штамповых ударных сталей, таких как  $\sigma_b$  – предел прочности,  $\delta\%$  – относительное удлинение,  $\phi$  – относительное сужение, НВ – твердость в МПа, НРС – твердость по Роквеллу,  $A_n$  – ударная вязкость в кгс·м/см<sup>2</sup> и их структура в исходном состоянии.

Для повышения механических свойств материалов нами исследовано влияние ВТМО – высокотемпературной термомеханической обработки с обработкой глубоким холодом на твердость и прочность легированных инструментальных вторично твердеющих сталей.

**Актуальность.** Исследовать ряд марок сталей штампового рубильного инструмента с различной концентрацией легирующих элементов и показать области применения данных материалов в судостроении, судоремонте, машиностроении.

В статье приведен ряд марок сталей штампового и рубильного инструмента такие как 60С2ХФА, 35Х5ВМФС, 55ХГСНМФ для деталей холодных штампов Х9ХСДИ-31Ш, а также опытные 7ХСМТ, 65ХЗГСВМФ, 70С2НДКМ, 140Г2Н2МС, 6Х4М2ФТ, 8Х5М2ФС и др. [1]

**Целью** настоящего исследования является изучение возможности повышения твердости инструментальных штамповых сталей, а также сталей для ударного инструмента (молотовых сталей, сталей рубильных молотков) в результате комбинированной обработки, заключающейся в сочетании высокотемпературной механической обработки (ВТМО) с обработкой глубоким холодом при 196 °С.

Известно, что ВТМО – это сочетание операции нагрева стали выше критических точек, пластической деформации в аустенитном состоянии и резкого охлаждения для получения мартенситной структуры с последующим низким отпуском для снятия напряжения. ВТМО обеспечивает повышение всего комплекса механических свойств стальных изделий – прочности, пластичности и вязкости.

После закалки термомеханически упрочнённой стали в структуре наряду с мартенситом присутствует некоторый процент нераспавшегося (остаточного) аустенита, который снижает твердость тем в большей степени, чем выше его объёмная доля.

Известно также, что обработка холодом закаленных легированных сталей позволяет заметно снизить количество мягкого остаточного аустенита и увеличить долю твердого мартенсита, что вызывает дополнительный прирост твердости закаленных изделий.

Представляло интерес объединить выше названные способы повышения прочности и твердости легированных сталей в единый технологический цикл комбинированную обработку: ВТМО + глубокое охлаждение в жидком азоте [2].

В качестве материала для исследования выбрали сталь 60С2ХФА, применяемую для зубил рубильных молотков, штамповые стали для горячего деформирования марок 35Х5ВМФС, 55ХГСНМФ, для деталей холодных штампов Х, 9ХС, ДИ-31Ш, а также опытные 7ХСМТ, 65Х3ГСВМФ, 70С2НДКМ, 140Г2Н2МС, 6Х4М2ФТ, 8Х5М2ФС и др.

Стали 60С2ХФА, Х, 9ХС, 7ХСМТ не обладают вторичной твердостью и поэтому обработка холодом для них является единственной операцией для распада остаточного аустенита в мартенсит. Стали 65Х3ГСВМФ, 55Х2ГСВ2М2Ф, 35Х5ВМФС, 6Х4М2ФТ, 8Х5М2ФС склонны или обладают вторичной твердостью, заключающейся в выделении специальных карбидов и превращении части остаточного аустенита в мартенсит при высоком отпуске в интервале температур 500–600 °С.

Для этих сталей обработка холодом не является единственным способом разложения остаточного аустенита – эта же цель может быть достигнута путем многократного (2-х или 3-х кратного) отпуска в интервале 530–550 °С.

Исследовали следующие режимы упрочнения:

- стандартная закалка в масле от оптимальных температур и отпуска в интервале 200–700 °С в течение 2-х часов;
- закалка в азоте – нагрев до оптимальных температур и охлаждение не в масле, а непосредственно в жидком азоте, затем отпуск;
- высокотемпературная термомеханическая обработка по режиму: нагрев заготовок до температур на 50–100 °С выше оптимальных, назначаемых при обычной закалке, горячая деформация свободной ковкой со степенью обжатия на 40–50 %, охлаждение в масле и заключительный отпуск при температурах 200–600 °С;
- комбинированная обработка (ВТМО + обработка холодом) – часть заготовок после (ВТМО) подвергали глубокому охлаждению в жидком азоте, а затем отпуску.

Механические свойства после различных режимов упрочнения оценивали по результатам замера твердости по Роквеллу на приборе ТК-2М (алмазный конус, нагрузка 150 кгс). Электрические свойства стали измеряли на образцах размером 5х5х100 мм с помощью прибора «Мост сопротивления (МОД-1)». Намагниченность насыщения измеряли на образцах размером 10х10х55 мм на баллистической установке БУ-3.

В табл. 1 приведены результаты замеров твердости легированных сталей после стандартной закалки и отпуска в интервале температур 200–700 °С, а также после закалки в жидком азоте. На примере стали 8Х2ГСВМФБ (ДИ-31Ш), закаленной от температуры 900 °С в масле (числитель) и непосредственно в жидком азоте (знаменатель), можно заметить положительное влияние глубокого охлаждения – все образцы имеют повышенную твердость. При закалке этой стали от 1000 °С в структуре наряду с мартенситом присутствует возросшая доля остаточного аустенита, не превращенного в мартенсит из-за снижения мартенситной точки. Твердость при этом заметно снижается и лишь при отпуске 500–600 °С возрастает из-за явления дисперсионного твердения спецкарбидами и из-за распада остаточного аустенита в мартенсит (вторичная твердость) Закалка от 1000 °С в жидком азоте сразу же дает твердость 65,5 HRC, что для инструмента является отличным результатом: последующий отпуск при 200 °С, 400 °С, 500 °С снижает твердость охлажденной в азоте стали, но она остается на достаточно высоком уровне. Для сталей Х(ШХ15), 9ХС, 70С2НДКМ, 140Г2Н2МС и 65Х3ГСВМФ тоже получили приращение твердости в результате глубокого охлаждения в жидком азоте, особенно после заключительного низкого отпуска при температуре 200°С (табл. 1) [3].

Таблица 1 – Изменение твердости легированных инструментальных сталей в зависимости от режима закалки, обработки холодом и температуры отпуска (числитель закалка в масле, знаменатель закалка в азоте)

Температура закалки	Температура отпуска, °С					
	Без отпуска	200	400	500	600	700
Сталь 8Х2ГСВМФБ(ДИ-31Ш)						
1000	55/65,5	–	–	–	–	–
Сталь Х(ШХ15)						
840	64 /66	60/63,5	52/55	42,5/ -	33,5/ -	-
850	Сталь 9ХС					
850	64/66	60/62	57/58	55/ 55	–	–
Сталь 70С2НДКМ						
850	62/65	58/61,5	52/54	45/ 48	–	–
Сталь 140Г2Н2МС						
800	63/65,5	59/63,5	56/60	54/55	45/46	–
Сталь 65Х3ГСВМФ						
1000	64/65,5	59/61	57/58,5	55/57	51/52	–

Для теплостойких штамповых сталей, предназначенных для горячего деформирования сплавов, важно получить повышенную твердость после заключительного высокого отпуска, поэтому теплостойкие стали 55ХГНСМФ, 55ГНСНМ2Ф, 35Х2ГСВ2М2Ф, 35Х5ВМФС, 6Х4М2ФТ и 8Х5М2ФС после закалки в жидком азоте отпускали в интервале температур 500–650 °С. Результаты замеров твердости представлены в табл. 2. Видно, что после закалки твердость находится на весьма высоком уровне для данного класса сталей. Высокий отпуск снижает твердость, но она остается на достаточно высоком уровне, выше твердости нужной для данного класса сталей. Твердость остается выше предъявленных требований для сплавов горячего деформирования (46–50 HRC) [10].

Известно, что удельное электросопротивление (МкОм х см) и намагниченность насыщения (Гс) являются структурно чувствительными физическими свойствами. Поэтому представляло интерес проверить количественные изменения этих характеристик в результате глубокой обработки холодом.

Образцы стали 60С2ХФА подвергали закалке в масле от температуры 850 °С (стандартная температура) и 1080 °С (повышенная с целью получить повышенный процент остаточного аустенита). Для сравнения вторую партию образцов закачивали от этих же температур, но не в масле, а в жидком азоте. Результаты измерений физических свойств иллюстрирует табл. 3. Видно, что намагниченность насыщения увеличивается, а удельное электросопротивление уменьшается в результате глубокого охлаждения до – 196 °С.

Таблица 2 – Твердость инструментальных теплостойких сталей после закалки в жидком азоте и высокого отпуска

Марка стали	Температура закалки, °С	температура отпуска ,С°				
		Без отпуска	500	550	600	650
55ХГНСМФ	1000	54	54	52	48	–
55ХГНСМ2Ф	1000	55	55	54	50	–
55Х2ГСВ2М2Ф	1100	64	58	58	56	52,5
35Х5ВМФС	1100	59	54	55	50,5	40,5
6Х4М2ФТ	1100	64	58,5	61	54,5	–
8Х5М2ФС	1100	64	62,5	64	58	–

Для стали 7ХСМТ и 9ХС эта закономерность проявляется в большей степени, чем для стали 60С2ХФА(табл. 3).

Таблица 3 – Изменение удельного электросопротивления, намагниченности насыщения, коэрцитивной силы и твердости стали 5ХНМ после закалки в масле от 900 °С, (числитель) и высокотемпературной термомеханической обработки (знаменатель)

Температура отпуска	$\rho$ нОм•м	$4n$ IS,Гс	Нс. Эрст.	Твердость HRC
без.отп.	0,39/-	1990/-	40,2/-	61/61,5
200	0,35/0,36	19090/2020	21,0/21,9	53/54,5
400	0,31/0,32	20810/21220	21,0/21,9	45/45,5
500	0,29/0,31	20810/21220	20,6/19,5	40,5/ 42,5
600	0,26/0,27	2190/19770	20,6/20,3	31/30,5

\*Режим ВТМО: аустенитизация при 900 °С, прокатка за один проход с обжатием 40 %, закалка в масле отпуск в интервале температур 200–600 °С, выдержка 2 часа

В табл. 4 приведены результаты замера твердости стали 60С2ХФА после различных – режимов упрочнения. Закалка в масле от температуры 860 °С и отпуск при 200°С являются для этой стали стандартной обработкой (обработка №1), применяемой для зубил рубильных молотков [7].

Закалка в масле от температуры 1000 °С приводит к увеличению в структуре стали остаточного аустенита и снижению твердости (обработка № 2).

Высокотемпературная термомеханическая обработка [7] (аустенитизация) при температуре 1000 °С деформация свободной ковкой с обжатием заготовок на 50 %, закалка в масле и отпуск при 200 °С) способствует измельчению зерна, повышению твердости и прочности стальных изделий (обработка № 3) Закалка в жидком азоте от температур 900 °С (обработка № 4) и 1000 °С (обработка № 5) позволяет получить более высокую твердость по сравнению с обычной закалкой в масле отпуск при 200 °С способствует измельчению зерна, повышению твердости и прочности стальных изделий (обработка № 3). Закалка в жидком азоте от температур 900 °С (обработка № 4) и 1000 °С (обработка № 5) позволяет получить более высокую твердость по сравнению с обычной закалкой в масле (обработка № 1 и № 2).

Таблица 4 – Изменение твердости стали 60С2ХФА после различных видов упрочнения и температуры заключительного отпуска

№ обработки	Вид обработки	Температура отпуска, °С						
		без отпуска	200	300	400	500	600	700
1	закалка 860 °С	60	58	57	54,5	43,5	36	21,5
2	закалка 1000 °С	57	57	56	53	45	40,5	24,5
3	ВТМО + ковка	61	60,5	59,5	57,4	46,5	39	27
4	закалка в азоте 900 °С	64	60,5	58,5	56	50	–	–
5	закалка в азоте 1000 °С	63,5	60	58	55,5	50	44	–
6	ВТМО + обработка в азоте	–	61	60	57	–	–	–

Обработка жидким азотом заготовок, подвергнутых ВТМО, обеспечивает самую высокую твердость для исследуемой стали после заключительного отпуска при 200–300 °С (комбинированная обработка № 6).

Заготовки стали 7ХСМТ, 65Х3ГСВМФ и Х(ШХ15) также подвергали комбинированной обработке: ВТМО + обработка холодом с заключительным отпуском при 200°С.

В результате получен заметный прирост твердости по сравнению со стандартной закалкой и таким же отпуском: для стали 7ХСМТ – 61 HRC (при стандартной закалке – 59 HRC), для стали 65Х3ГСВИФ – 61 HRC (при стандартной закалке – 58 HRC), для стали Х(ШХ15) – 63,5 HRC (при стандартной закалке – 62 HRC).

**Выводы.** Комбинированная обработка (ВТМО + охлаждение в жидком азоте с последующим низким отпуском) повышает твердость легированных инструментальных сталей, при этом достигается улучшение структурного состояния, такие как измельчение зерна в результате ВТМО и уменьшение количества остаточного аустенита в результате его распада в мартенсит при отрицательных температурах.

Выбор и назначение режимов термической и термомеханической обработки для инструментов деформирующих материал в холодном и горячем состоянии. Определение новых технологических свойств сталей для инструментов, обрабатывающих конструкционные материалы в судостроении и машиностроении.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка стали и сплавов / М. Л. Бернштейн. – М. : Металлургия, 1968. – 1020 с.
2. Гуляев А. П. Термическая обработка стали / А. П. Гуляев. – М. : Машгиз, 1960. – 329 с.
3. Технологія конструкційних матеріалів : навч. посібник для вузів / В. В. Атаманюк. – К. : Кондор, 2006. – 528 с.
4. Лахтин Ю. М. Новые стали и сплавы в машиностроении / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Машиностроение, 2006. – 223 с.
5. Паисов И. В. Термическая обработка стали и чугуна / И. В. Паисов. – М. : Металлургия, 2008. – 264 с.
6. Гедвилло А. И. Новые конструкционные материалы / А. И. Гедвилло. – Херсон : Издательство ХГУ, 2004. – 181 с.
7. Дальский А. М. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский, Т. М. Барсукова, Л. Н. Бухаркин и др.; под ред. А. М. Дальской. – М. : Технич. книга, 2004. – 512 с.
8. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка / Ю. М. Лахтин – М. : Машиностроение, 1983. – 359 с.
9. Полухин П. И. Технология металлов и сварка / П. И. Полухин, Б. В. Гринберг, В. Т. Жадан, С. К. Кантеник, Д. И. Васильев. – М. Высшая школа, 1977. – 464 с.
10. Кудрявцев И. В. Специальные стали и сплавы / И. В. Кудрявцев, Ф. Ф. Химушин. – М. : Машиностроение, 1968. – 446 с.

### REFERENCES

1. Bernshteyjn M. L. Termomekhanicheskaya obrabotka stali i splavov / M. L. Bernshteyjn. – M. : Metallurgiya, 1968. – 1020 s.
2. Gulyaev A. P. Termicheskaya obrabotka stali / A. P. Gulyaev. – M. : Mashgiz, 1960. – 329 s.
3. Tekhnologiya konstrukciyjnikh materialiv : navch. posibnik dlya vuziv / V. V. Atamanyuk. – K. : Kondor, 2006. – 528 s.
4. Lakhtin Yu. M. Novihe stali i splaviv v mashinostroenii / Yu. M. Lakhtin, Ya. D. Kogan. – M. : Mashinostroenie, 2006. – 223 s.
5. Paisov I. V. Termicheskaya obrabotka stali i chuguna / I. V. Paisov. – M. : Metallurgiya, 2008. – 264 s.
6. Gedvillo A. I. Novihe konstrukcionnihe materialih / A. I. Gedvillo. – Kherson : Izdatelstvo KhGU, 2004. – 181 s.

7. Daljskiyj A. M. Tekhnologiya konstrukcionnikh materialov / A. M. Daljskiyj, T. M. Barsukova, L. N. Bukharkin i dr.; pod red. A. M. Daljskogoyj. – M. : Tekhnich. kniga, 2004. – 512 s.
8. Lakhtin Yu. M. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka / Yu. M. Lakhtin – M. : Mashinostroenie, 1983. – 359 s.
9. Polukhin P. I. Tekhnologiya metallov i svarka / P. I. Polukhin, B. V. Grinberg, V. T. Zhadan, S. K. Kantenik, D. I. Vasiljev. – M. Vihsshaya shkola, 1977. – 464 s.
10. Kudryavcev I. B. Specialnihe stali i splaviv / I. V. Kudryavcev, F. F. Khimushin. – M. : Mashinostroenie, 1968. – 446 s.

**Малигін Б. В., Касілов О. А. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ**

*В якості матеріалу для дослідження обрали сталь 60С2ХФА, (яка застосовується для зубіл, рубільних молотків), штампів сталі для горячого деформування марок 35Х5ВМФС, 55ХГСНМФ, матеріали для деталей холодних штампів Х, 9ХС, ДИ-31, а також дослідні 7ХСМТ, 65Х3ГСВМФ, 70С2НДКМ, 140Г2Н2МС, 6Х4М2ФТ, 8Х5М2ФС. Сталі оброблялись холодом для повного розпаду аустеніта в мартеніт. Проведено дослідження вторинної твердості сталей, що володіють цим властивістю. Проводились дослідження структурно-чутливих властивостей, властивостей питомого електроопору, намагніченості насичення, коерцитивної сили та твердості легованих сталей.*

**Ключові слова:** легована сталь, низькотемпературна термомеханічна обробка, закалка в азоті, коерцитивна сила, питомий електроопір.

**Malygin B. V., Kasilov O. A. INVESTIGATION OF THERMOMECHANICAL PROCESSING OF TOOL STEEL**

*As a material for the research we have chosen steel (60C2XFA) (used for chisels, chipping hammers), stamping steels for hot deformation, grades 35X5VMFC, 55XGCHMF, materials for parts of cold stamping X, 9XS, DI-31, and prototypes 7XCMT, 65X3GCBMF, 70C2NDKM, 140G2H2MS, 6X4M2FT, 8X5M2FS. The steels were treated cold to complete decay of austenite to martensite. A study of the secondary hardness of steels having this property was conducted. Structural sensitive properties, the specific electric resistance, the saturation magnetization, the coercive force and hardness of alloy steels have been studied.*

**Key words:** alloy steel, low-temperature thermomechanical treatment, hardening in nitrogen, coercive force, resistivity, saturation magnetization.

© Малигін Б. В., Касілов О. А.

Статтю прийнято  
до редакції 23.05.17