

УДК 621.785(075.8)

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ ИЗ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МАГНИТО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Таскин В. Ю.<sup>1</sup>, Ковалева А. А.<sup>1</sup>, Таскин В. Ю.<sup>2</sup>, Никифорова Э. М.<sup>1</sup>, Еромасов Р. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск  
Красноярск, Россия (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79), e-mail: [kmp198@inbox.ru](mailto:kmp198@inbox.ru)  
Бийский технологический институт АлтГТУ (БТИ АлтГТУ), Бийск  
Бийск, Россия (659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27), e-mail: [turist@bti.secna.ru](mailto:turist@bti.secna.ru)

Повышение эксплуатационных характеристик деталей и инструментов, изготавливаемых из легированных сталей, является актуальной проблемой металлургических отраслей промышленности. Получение высокопрочных, устойчивых к эксплуатационным воздействиям изделий из штамповых сталей является важнейшей задачей материаловедения. Эта работа ведется по следующим основным направлениям: получение новых материалов и совершенствование традиционных методов их изготовления, улучшение их механических свойств.

Эксплуатационные характеристики штампов во многом зависят от сочетания прочностных и пластических свойств полученных изделий из сложнолегированных штамповых сталей. Для этого работы выдуться по разным направлениям, связанным с совершенствованием традиционной термической обработки так и проведение ее совместно с другими видами обработки: ультразвуковой, термомеханической, химико-термической и т. д. Применение магнито-термической обработки дает возможность получения таких изменений структуры сталей, которые позволяют получать повышенные пластические свойства без уменьшения прочностных.

Ключевые слова: стали штамповые, термообработка, магнитные поля, механические свойства, оптимальные параметры.

## IMPROVING THE PERFORMANCE OF PRODUCTS FROM COMPLEX ALLOYED STEELS WITH A MAGNETO-THERMAL PROCESSING

Taskin V. Yu.<sup>1</sup>, Kovalev A. A.<sup>1</sup>, Taskin V. Y<sup>2</sup>., Nikiforova E. M.<sup>1</sup>, Eromasov R. G.<sup>1</sup>

Siberian Federal University, Krasnoyarsk  
Krasnoyarsk, Russia (660041, Krasnoyarsk, Svobodny Prospect, 79), e-mail: [kmp198@inbox.ru](mailto:kmp198@inbox.ru)  
Biysk Technological Institute of Altai State Technical University (BTI AltSTU), Biysk  
Biysk, Russia (659 305, Altaiyskiy kray, Biysk, ul. Trofimova, 27)

Improving the performance of parts and tools made from alloy steel, steel is an urgent problem industries. Preparation of high-resistant performance impacts of products from die steels is an important task in materials science. This work is being done in the following areas: production of new materials and improvement of traditional methods of their manufacture, to improve their mechanical properties.

The performance characteristics of stamps depends largely on a combination of strength and plastic properties of the obtained product out of complex die steels. For this work blowing in different directions related to the improvement of the traditional thermal processing and holding it in conjunction with other forms of treatment: ultrasound, thermomechanical, thermochemical, etc. Use of magneto-thermal processing makes it possible to obtain such changes in the structure of steel, which provide enhanced plastic properties without sacrificing mechanical properties.

Keywords: die steel, heat treatment, magnetic fields, mechanical properties, the optimum parameters.

### Введение

Повышение эксплуатационных характеристик деталей и инструментов, изготавливаемых из легированных сталей, является актуальной проблемой металлургических отраслей промышленности.

Особенностью современных технологических процессов изготовления высококачественных штампов, прессового, резьбового и лезвийного инструментов является

использование комбинированных методов, включающих традиционную термическую, термо-механическую, ультразвуковую, лазерную и химико-термическую обработки в сочетании с воздействием сильных электрических, ионных, магнитных и других видов полей.

Получение высокопрочных, устойчивых к эксплуатационным воздействиям изделий из штамповых сталей является важнейшей задачей материаловедения. Эта работа ведется по следующим основным направлениям: получение новых материалов и совершенствование традиционных методов их изготовления, улучшение их механических свойств. Перспективными и эффективными методами следует считать применение различных видов обработки совместно с термообработкой без изменения состава используемых сложнелегированных материалов.

Термообработки в магнитном поле (ТОМП) и ее разновидность – магнито-термическая обработка (МагТО) позволяют достичь более высокого уровня механических свойств инструментальных сталей по сравнению с другими видами комбинированных обработок.

Практическая реализация этих преимуществ сдерживается недостаточной изученностью данного метода. Теоретические обоснования и практическое применение магнитных полей на превращения в сталях опубликованы в работах Бернштейна М. Л. [1], Малыгина Б. В. [2]. Показано, что действие внешнего магнитного поля может быть значительным, если хотя бы одна из структурно-составляющих фаз является ферромагнетиком. Особенность этого способа воздействия заключается во влиянии энергии магнитного поля на термодинамику, механизм и кинетику фазовых превращений с целью получения изменений структуры. Эффекты влияния магнитных полей следует ожидать потому, что структурные составляющие в сталях сильно отличаются по своим магнитным свойствам. Так, аустенит абсолютно немагнитен, феррит магнитен до температуры Кюри, то есть ниже 768 °С, цементит магнитен при температуре ниже 217 °С, перлит, сорбит, троостит, бейнит и мартенсит – магнитны, Сг и Мп – антиферромагнетики. Различной магнитной восприимчивостью обладают как легирующие элементы сталей V, Сг, Мп, Мо, W и другие, так и их карбиды.

### **Методика исследований**

В качестве объектов исследования были выбраны наиболее широко применяемые штамповые стали с различными свойствами. Для изучения влияния (МагТО) на механические свойства были использованы стали для штампового и прессового инструмента.

Для горячей штамповки (ГОСТ 5950-73) выбраны стали 5ХНМ с умеренной теплостойкостью и повышенной вязкостью; а также стали 4Х5МФС, 4Х5В2ФС, 3Х3М3Ф, характеризующиеся повышенной теплостойкостью [5].

Легирующими элементами в этих сталях являются карбидообразующие элементы (W, V, Mo, Cr), повышающие стойкость стали при соприкосновении с горячим металлом, и некарбидообразующие элементы (Si и Ni). В сталь 5ХНМ, применяемую для молотовых штампов, подвергаемых ударным нагрузкам, с целью повышения вязкости и прокаливаемости добавляют никель, а для повышения теплостойкости – молибден [4]. Химический состав этих сталей приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сталей для горячей штамповки (ГОСТ 5950-73)

Марка стали	Химический состав стали, масс %							
	C	Mn	Si	Cr	W	V	Mo	Ni
5ХНМ	0,50-	0,50-	0,10-	0,50-	-	-	0,15-	1,40-
	0,60	0,80	0,40	0,80			0,30	1,80
4Х5МФС	0,32-	0,20-	0,90-	4,50-	-	0,30-	1,20-	
	0,40	0,50	1,20	5,50		0,50	1,50	
4Х5В2ФС	0,35-	0,15-	0,80-	4,50-	1,60-	0,60-	-	
	0,45	0,40	1,20	5,50	2,20	0,90		
3Х3М3Ф	0,27-	0,30-	0,20-	2,80-	-	0,40-	2,50-	
	0,34	0,60	0,40	3,30		0,60	3,00	

Магнитная обработка стальных образцов и изделий проводилась с использованием мощного стационарного электромагнита СП58Б с охлаждаемыми магнитными катушками. Диапазон регулируемой напряженности постоянного магнитного поля  $H$  от 0 до  $23,9 \cdot 10^5$  А/м.

В качестве образцов для исследований применялись стальные стержни с квадратным сечением 10x10 мм и длиной 55 мм (ГОСТ 945478-78) и образцы 30x30 мм длиной 70мм. Для промышленных испытаний изготавливались стальные изделия необходимых размеров. Нагрев образцов проводили в электропечах с автоматическим регулированием температуры типа СНОЛ-1.1,6/12-МЗ-4.2, имеющих следующие электрические характеристики: напряжение 220 В, мощность 2,5 кВт, частота 50 Гц.

Термическая обработка образцов и изделий проводилась согласно выбранному режиму, который определялся в зависимости от марки стали. При этом она проводилась одновременно с образцами, прошедшими и не прошедшими магнитную обработку. Механические испытания проводились в лабораториях университета и промышленных

предприятий. Технологический процесс термообработки состоял из закалки и отпуска. Нагрев образцов под закалку проводили либо однократно, либо ступенчато с промежуточными подогревами. Закалку образцов осуществляли в масло с последующей промывкой в воде. Затем образцы подвергали однократному или многократному отпуску с последующим охлаждением на воздухе. Температуры закалки и термоциклирования назначали в соответствии с маркой стали.

### Результаты исследований и их обсуждения

После магнитной обработки термическую обработку стали 3Х3МЗФ проводили по режиму, который включал в себя закалку при температуре 1060 °С, повторную закалку с подогревом при температуре 880 °С и двойной отпуск при температурах 580 °С и 540 °С (таблица 2).

Таблица 2. Результаты магнито-термической обработки стали 3Х3МЗФ

Марка стали	Параметры магнито-термической обработки							Механические свойства	
	Н 10 <sup>5</sup> , А/м	τ, мин	t <sub>зак1</sub> /τ <sub>зак1</sub> , °С/мин	t <sub>под1</sub> /τ <sub>под1</sub> , °С/мин	t <sub>зак2</sub> /τ <sub>зак2</sub> , °С/мин	t <sub>отп1</sub> /τ <sub>отп1</sub> , °С/мин	t <sub>отп2</sub> /τ <sub>отп2</sub> , °С/мин	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НRC
3ХМЗФ	без поля		1060/60	880/20	1060/25	580/60	540/60	42,7	48
3ХМЗФ	20,7	5	1060/60	880/20	1060/25	580/60	540/60	57,3	48

t<sub>под</sub>, t<sub>зак</sub>, t<sub>отп</sub> – температуры подогрева, закалки, отпуска.

τ, τ<sub>под</sub>, τ<sub>зак</sub>, τ<sub>отп</sub> – время намагничивания, подогрева, закалки, отпуска.

Влияние ориентации образцов относительно силовых линий магнитного поля на механические свойства сталей было изучено на примере штамповой стали 5ХНМ. Термическая обработка стали включала в себя закалку с подогревом и отпуск. Магнитную обработку образцов проводили в поле с напряженностью Н 16,9·10<sup>5</sup> А/м в течение 5 минут, при этом образцы были ориентированы вдоль поля (а) или поперек (б) направления магнитных силовых линий (таблица 3).

Таблица 3. Результаты магнито-термической обработки штамповой стали 5ХНМ

Марка стали	Направление магнитного поля	Параметры магнитно-термической обработки					Механические свойства	
		$H \cdot 10^5$ , А/м	$\tau$ , мин	$t_{\text{под}}/\tau_{\text{под}}$ , °С/мин	$t_{\text{зак}}/\tau_{\text{зак}}$ , °С/мин	$t_{\text{отп}}/\tau_{\text{отп}}$ , °С/мин	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НRC
5ХНМ	а	16,9	50	720/20	850/25	550/60	25	40
5ХНМ	Без МагТО			720/20	850/25	550/60	12	38
5ХНМ	б	20,7	5	720/20	850/25	550/60	50	39
5ХНМ	Без МагТО			720/20	850/25	550/60	20	38

а – направление магнитных силовых линий вдоль образца.

б – направление магнитных силовых линий поперек образца.

$t_{\text{под}}$ ,  $t_{\text{зак}}$ ,  $t_{\text{отп}}$  – температуры подогрева, закалки, отпуска.

$\tau$ ,  $\tau_{\text{под}}$ ,  $\tau_{\text{зак}}$ ,  $\tau_{\text{отп}}$  – время намагничивания, подогрева, закалки, отпуска.

При разной ориентации образцов в магнитном поле меняются их механические свойства. Предшествующая магнитная обработка незначительно повлияла на изменение твердости, но способствовала увеличению ударной вязкости. Причем после МагТО образцов при ориентации их поперек направления магнитных силовых линий происходило увеличение ударной вязкости в 2,5 раза (с 20 до 50 Дж/см<sup>2</sup>), в то время как при ориентации образцов вдоль направления магнитных силовых линий ударная вязкость возрастает лишь в два раза (с 12 до 25 Дж/см<sup>2</sup>) по сравнению с образцами, прошедшими только ТО. Для стали 4Х5МФС применена циклическая предварительная магнитная обработка. Термическая обработка этой стали включала в себя закалку с предварительным подогревом, затем следовали два отпуска (таблица 4). Предварительная магнитная обработка заключалась в трехразовом намагничивании образцов по две минуты в магнитном поле с напряженностью  $4,8 \cdot 10^5$  А/м и  $16,9 \cdot 10^5$  А/м. В результате ударная вязкость обработанных в магнитном поле образцов возрастает примерно в два раза (с 13 до 27 Дж/см<sup>2</sup>), при этом твердость почти не меняется (таблица 4).

Таблица 4. Результаты магнитно-термической обработки штамповой стали 4Х5МФС

Марка стали	Параметры магнитно-термической обработки						Механические свойства	
	$H \cdot 10^5$ , А/м	$\tau$ , мин	$t_{\text{под}}/\tau_{\text{под}}$ , °С/мин	$t_{\text{зак}}/\tau_{\text{зак}}$ , °С/мин	$t_{\text{отп1}}/\tau_{\text{отп1}}$ , °С/мин	$t_{\text{отп2}}/\tau_{\text{отп2}}$ , °С/мин	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НRC
4Х5МФС	Без МагТО		750/20	1030/45	560/60	520/60	13	44
4Х5МФС	4,8	цикл * 2					26	44


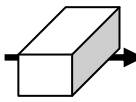
4X5MФС	16,9						27	45
--------	------	--	--	--	--	--	----	----

$t_{\text{под}}, t_{\text{зак}}, t_{\text{отп}}$  – температуры подогрева, закалки, отпуска.

$\tau, \tau_{\text{под}}, \tau_{\text{зак}}, \tau_{\text{отп}}$  – время намагничивания, подогрева, закалки, отпуска.

Циклическая магнитная обработка образцов из стали 4X5B2ФС [3] проведена при разной ориентации их в магнитном поле с напряженностью  $16,9 \cdot 10^5$  А/м и времени намагничивания 3 цикла по 2 минуты. Последующая термическая обработка включала в себя закалку с подогревом и двумя отпусками.

Таблица 5. Результаты магнито-термической обработки стали 4X5B2ФС в зависимости от ориентации образцов в магнитном поле

Ориентация образца	Параметры магнито-термической обработки						Механические свойства	
	$H$ $10^5$ , А/м	$\tau$ , мин	$t_{\text{под}}/\tau_{\text{под}}$ , °С/мин	$t_{\text{зак}}/\tau_{\text{зак}}$ , °С/мин	$t_{\text{отп1}}/\tau_{\text{отп1}}$ , °С/мин	$t_{\text{отп2}}/\tau_{\text{отп2}}$ , °С/мин	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НRC
Без МагТО	-						35	47
	16,9	3 цикла *2	880\20	1080/45	580/60	540/60	75	48
							65	49

$t_{\text{под}}, t_{\text{зак}}, t_{\text{отп}}$  – температуры подогрева, закалки, отпуска.

$\tau, \tau_{\text{под}}, \tau_{\text{зак}}, \tau_{\text{отп}}$  – время намагничивания, подогрева, закалки, отпуска.

Результаты проведенных исследований показали, что механические свойства стальных образцов также зависят от ориентации их в магнитном поле. Наибольший эффект достигается при вертикальной ориентации образцов в магнитном поле. Ударная вязкость возрастает с 35 до 75 Дж/см. Твердость при этом практически не меняется. При замене ориентации образцов с вертикальной на продольную происходит незначительное увеличение твердости (с 48 до 49 НRC), а ударная вязкость при этом снижается до 65 Дж/см<sup>2</sup>.

## **Заключение**

Таким образом, проведенные исследования показали, что МагТО приводит к увеличению ударной вязкости легированных штамповых сталей без изменения их твердости. Ударная вязкость стали 5ХНМ возрастает более чем в два раза. Определены оптимальные технологические параметры МагТО для сталей 5ХНМ, 3Х3М3Ф, 4Х5МФС, 4Х5В2ФС. При МагТО с циклической магнитной обработкой стали 4Х5В2ФС при вертикальной ориентации образцов ударная вязкость увеличивается до 75 Дж/см<sup>2</sup>. Максимальный эффект от МагТО для штамповых сталей достигается с использованием оптимальных параметров магнитного поля для каждой марки стали с необходимой ориентацией образцов и режимом намагничивания [3]. При нарушении технологических режимов термообработки сталей эффективность магнитотермической обработки снижается.

## **Список литературы**

1. Берштейн М. Л., Пустовойт В. Н. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. – М.: Машиностроение, 1987. – 256 с.
2. Малыгин Б. В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 112 с.
3. Таскин В. Ю., Ковалева А. А. Способ термической обработки изделий из легированной штамповой стали: Патент России № 2383630.2010.Бюл. №7.
4. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
5. Позняк Л. А., Скрынченко Ю. М., Тишаев С. И. Штамповые стали. – М.: Металлургия, 1980. – 244 с.

### **Рецензенты:**

Прошкин Александр Владимирович, д-р.техн.наук, профессор, начальник лаборатории углеродистых и футеровочных материалов ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», Красноярск.

Руденко Анатолий Павлович, д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии конструкционных материалов и машиностроения», ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», г. Красноярск.