

## ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ШТАМПОВ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗ СТАЛИ X12MФ

Д. М. Мордасов<sup>1</sup>, С. В. Зотов<sup>2</sup>

*Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1);  
ООО «Инженерный центр «Диагност-Т», (2) г. Тамбов, Россия;  
mit@mail.nnn.tstu.ru*

**Ключевые слова:** закалка; изотермический отжиг; инструментальная сталь; микроструктура; отпуск; термоциклирование.

**Аннотация:** Исследовано влияние температурно-временных параметров термической обработки по режиму аустенизации, отжига и отпуска на структуру и свойства стали X12MФ. Разработаны схемы предварительной, первой и окончательной термической обработки инструментальной стали X12MФ. Установлены зависимости физико-механических свойств стали X12MФ от технологических параметров термоциклической обработки. Показано, что увеличение числа циклов приводит к росту концентрации карбидной фазы в феррито-карбидной смеси, а после закалки и высокого отпуска карбиды укрупняются и ориентируются в направлении первичных мартенситных игл. Испытания штампа из стали X12MФ, подвергнутого термоциклической обработке, работающего в условиях горячего деформирования при температуре 500 °С, показали повышение в 2 раза стойкости деталей штампа, по сравнению с деталями после традиционной термической обработки.

---

На сегодняшний день актуальными задачами в инструментальном производстве являются значительное повышение технического уровня и улучшение качества изготавливаемого инструмента, обеспечение более полного удовлетворения потребностей в нем машиностроения, металлообработки и других отраслей народного хозяйства.

Основным недостатком сталей, применяемых для изготовления рабочих частей штампов горячей штамповки (5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ, 5ХНТ, 7ХЗ, 8ХЗ и др.), является их низкая твердость и малая износостойкость. Одним из перспективных видов упрочнения сталей является термоциклическая обработка (ТЦО) [1]. В отличие от других видов термообработки, структурные и фазовые превращения при термоциклической обработке совершаются многократно при изменяющемся температурном режиме «нагрев – охлаждение». В результате такого воздействия в структуре материала накапливаются изменения, улучшающие качество изделий и придающие им свойства, недостижимые при традиционной термической обработке.

В настоящее время большое внимание уделяется изучению возможностей применения ТЦО для улучшения структуры и механических свойств инструментальных сталей. Разработаны новые технологии как предварительной, так и окончательной.

чательной ТЦО [2 – 4]. Однако выбор режимов ТЦО зачастую ведется эмпирическим путем, а планируемое повышение пластичности стали приводит к снижению уровня ее прочностных свойств.

Таким образом, важной технологической задачей является разработка и корректировка методов термоциклической обработки. В статье рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных свойств штампового инструмента за счет применения установленных закономерностей формирования структуры и свойств в стали Х12МФ при циклическом тепловом воздействии.

Штамповые стали для горячего деформирования должны иметь определенный комплекс свойств, к наиболее важным из них относятся:

- теплостойкость (сопротивляемость отпуску);
- жаропрочность (большие предел текучести и сопротивление износу при высоких температурах);
- вязкость (высокая ударная вязкость для предупреждения поломок и выкрашивания);
- износостойкость (определяется твердостью стали, количеством и типом карбидной фазы).

Кроме того, стали для штампов, поверхностный слой которых сильно нагревается (выше 600 °С), должны иметь высокие температуры критических точек. Нагрев рабочих слоев штампа определяется не только температурой деформируемого металла, но и длительностью контакта с ним и условиями охлаждения.

Сталь Х12МФ является самой популярной штамповой сталью в мире. Общие технические условия на эту сталь регламентирует ГОСТ 5950–2000. Сталь достаточно технологична и при грамотном выборе режимов термообработки обеспечивает получение приемлемых характеристик.

Основными легирующими элементами в стали Х12МФ являются углерод и хром. Благодаря этому сталь содержит заметное количество твердых карбидов типа М7С3 на базе карбида хрома, в состав которых также входят железо, молибден и ванадий. Часть карбидов эвтектического происхождения имеет достаточно крупные размеры (до 50 мкм) и пластинчатую форму. Большое количество (22 – 24 %) твердых (HV 1200...1600) карбидов обеспечивает высокую износостойкость стали.

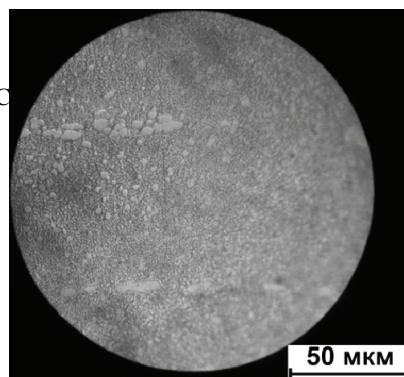
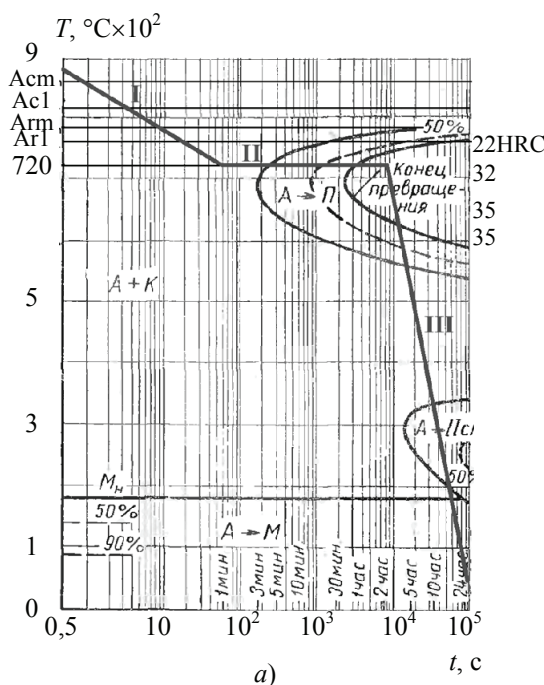
Максимальная твердость достигается при достаточном насыщении твердого раствора углеродом и легирующими элементами, но при содержании остаточного аустенита не больше 15 %. Как правило, температуры закалки на максимальную твердость – 980...1020 °С.

При изготовлении пуансонов и матриц из стали Х12МФ рациональный технологический процесс термической обработки состоит из следующих операций, чередующихся с механической обработкой:

- предварительная термическая обработка (отжиг заготовок);
- предварительная механическая обработка;
- первая упрочняющая термическая обработка – улучшение (закалка, отпуск);
- окончательная механическая обработка;
- окончательная упрочняющая термическая обработка (закалка, отпуск);
- шлифование и полирование.

Разрабатываемая технология термической обработки направлена на решение производственной задачи – обеспечение возможности использования стали Х12МФ для изготовления штампов горячего деформирования. При этом должны быть достигнуты следующие структурные и механические характеристики:

- твердость – не менее 50 HRC;
- ударная вязкость KCU – не менее 35 Дж/см<sup>2</sup>;
- микроструктура – троостит;



**Рис. 1. Изотермический отжиг стали X12MF:**  
 а – последовательность;  
 б – микроструктура

- величина зерна – не менее 12 балла;
- карбидная неоднородность – 2 балла;
- максимальная рабочая температура – +500 °С.

Для снятия внутренних напряжений, улучшения обрабатываемости резанием, получения мелкозернистой равномерной структуры стали для последующей качественной закалки, исправления дефектной структуры выбраны режимы изотермического отжига стали X12MF. На рисунке 1, а показана его последовательность, для наглядности совмещенная с термокинетической диаграммой. На линии, отражающей ход процесса термообработки, выделены три характерных участка, которые соответствуют следующим операциям:

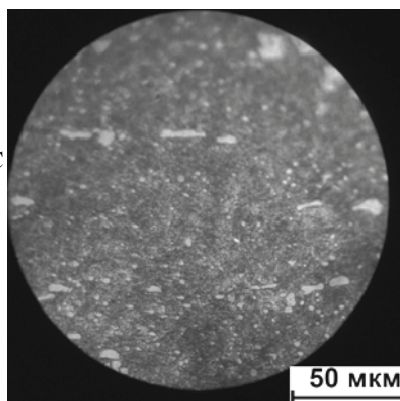
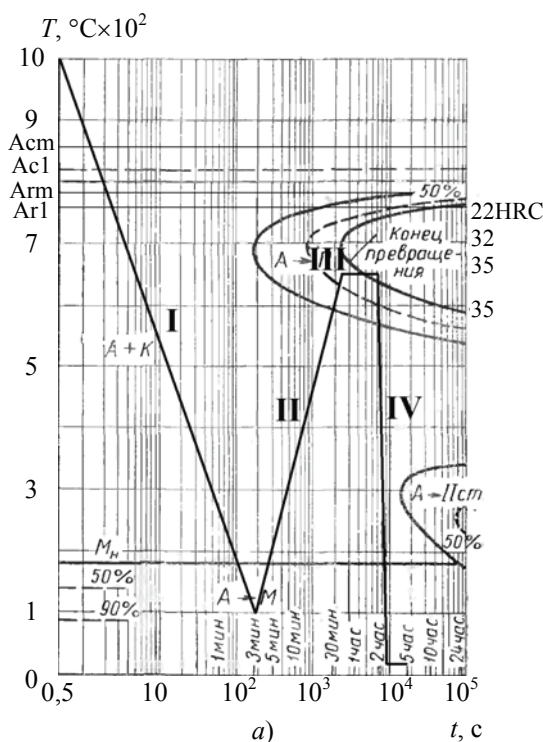
- I – охлаждение на воздухе до температуры 720 °С;
- II – выдержка в печи в течение 2 ч при температуре 720 °С;
- III – охлаждение с печью до комнатной температуры.

После такого отжига твердость стали X12MF становится равной не более 255 НВ. Структура стали после отжига представляет собой зернистый перлит (рис. 1, б), а также первичные и вторичные карбиды  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_{23}C_6$  и  $VC$ , общее содержание которых в структуре лежит в пределах 18 – 22 %. Такая структура является оптимальной для последующей закалки.

Первая упрочняющая термическая обработка проводится в целях подготовки стали к окончательной механической обработке [5]. В процессе такого термического улучшения происходит распад мартенсита закалки и образуется зернистый перлит (сорбит, троостосорбит (до 15 %), сохранивший ориентировку мелко- и среднеугольчатого мартенсита). В результате первой упрочняющей термообработки повышаются пластичность и ударная вязкость стали, прочность и твердость изделия сохраняют хорошие показатели.

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований выбраны режимные параметры процесса термического улучшения стали X12MF. На рисунке 2, а показана последовательность выполняемых операций:

- I – охлаждение с 1000 °С в закалочной жидкости;
- II – прогрев детали в печи, нагретой до 650 °С;



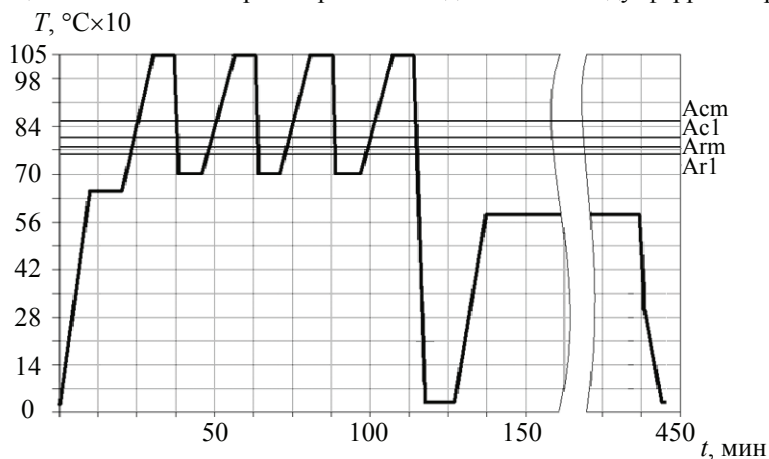
**Рис. 2. Процесс предварительной термообработки:**  
 а – последовательность;  
 б – микроструктура

III – выдержка нагретой детали при 650 °С (отпуск);

IV – охлаждение в закалочной жидкости до комнатной температуры.

Скорость охлаждения после отпуска не имеет существенного значения, однако с учетом того, что сталь X12MF склонна к отпускной хрупкости, было применено ее ускоренное охлаждение в закалочной жидкости Политерм ПК-М.

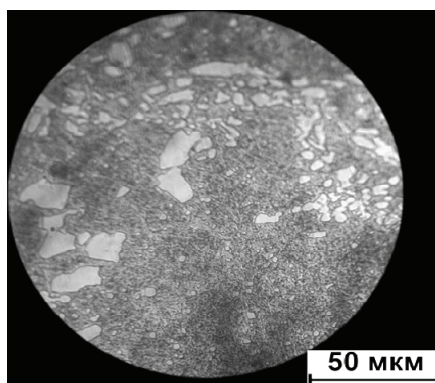
После анализа и обобщения существующих технологий термощиклической обработки, а также в результате экспериментальных исследований, создана технология окончательной упрочняющей термической обработки, последовательность которой показана на рис. 3. Выполнение окончательной термической обработки позволяет повысить ударную вязкость деталей штампа при сохранении высокой твердости и прочности. Это происходит благодаря циклическому чередованию процессов взаимного «растворения – выделения» между ферритокарбидной



**Рис. 3. Режим окончательной упрочняющей термообработки**

смесью и аустенитом. Такой режим способствует получению благоприятного структурного состояния стали и возможности протекания процессов измельчения зерна, коагуляции и сфероидизации карбидной фазы.

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены образцы инструментальной стали X12MФ сечением (10×10) мм и высотой 40 мм. В целях обеспечения возможности сравнения созданной технологии термоциклической обработки стали, один образец был подвергнут традиционной термической обработке, предусматривающей после проведения отжига нагрев под закалку до 1000 °С, охлаждение до (30 ± 10) °С, отпуск при 550 °С с выдержкой в течение 1,5 ч, охлаждение до комнатной температуры на воздухе (рис. 4).



**Рис. 4. Микроструктура стали X12MФ после традиционной термической обработки**

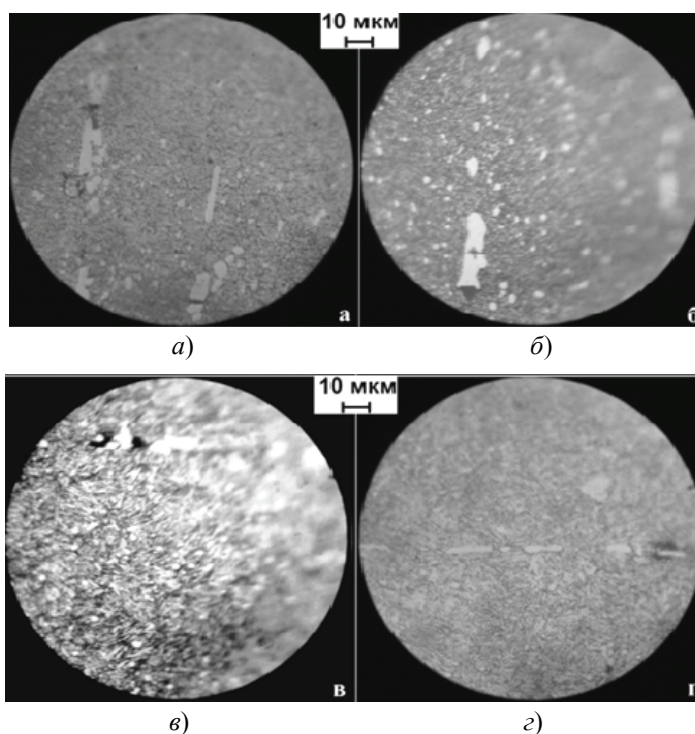
В структуре стали (см. рис. 4) присутствуют: аустенит остаточный, карбиды первичные и вторичные, мартенсит отпуска. Более темные участки на микрофотографии представляют собой мартенсит отпуска (в силу большей скорости травления мартенсита). Мартенсит отпуска сохраняется при 550 °С благодаря содержанию в стали кремния, хрома и ванадия. В целях идентификации образцов последние были промаркированы. В таблице 1 приведена маркировка экспериментальных образцов и соответствующий им режим термической обработки.

Таблица 1

**Маркировка и режимы термообработки экспериментальных образцов**

Маркировка образца	Термическая обработка, °С								
	Изотермический отжиг	Аустенизация					Отпуск		
		I	II	III	IV	V	I	II – V	
0	Состояние поставки								
1		–	–					–	
2		↑1000 → 1000 (3 мин) ↓20	–					↑550 → 550 (1,5 ч) ↓20	–
3			–					–	
4	↑880 ↓720 → 720 (2 ч) ↓20		–					↓300 (2,5 мин)	
5			–					↓30 (5 мин)	
6			–					→30 (5 мин)	
7		↑1000 → 1000 (3 мин) ↓20	↑650 → 650 (10 мин) ↑1050 → 1050 (7 мин)	↓700 (60 с) →700 (8 мин) ↑1050 → 1050 (7 мин)	↓700 (60 с) →700 (8 мин) ↑1050 → 1050 (7 мин)	–	↓700 (60 с) →700 (8 мин) ↑1050 → 1050 (7 мин)	↑650 → 650 (2 ч) ↓20	↑580 → 580 (5 ч) ↓20 (3 мин)

Примечание: ↑ – нагрев; ↓ – охлаждение; → – выдержка.



**Рис. 5. Микроструктура образцов стали X12МФ после закалки и отпуска (580 °С, 5 ч) в зависимости от числа термоциклов:**  
*а* – одного (образец № 4); *б* – двух (образец № 5);  
*в* – трех (образец № 6); *г* – четырех (образец № 7)

На рисунке 5 представлены фотографии микроструктур после различных этапов ее термоциклической обработки. Структура образца, прошедшего один цикл термической обработки (образец № 4) представляет собой зернистый перлит (сорбит отпуска), аустенит остаточный до 10 %, феррит, карбиды первичные и вторичные, мартенсит отпуска. Образец № 5, прошедший два цикла термической обработки, содержит меньше остаточного аустенита (до 5 %), феррит, карбиды первичные и вторичные, мартенсит отпуска. Структура образца № 5 – зернистый перлит (сорбит отпуска), мартенсит отпуска, аустенит остаточный. Наличие мартенсита отпуска в образцах № 4 и № 5 обусловлено присутствием в составе стали кремния, хрома и ванадия. Образцы № 6 и № 7 содержат феррит, первичные и вторичные карбиды. Структура образца № 6 – зернистый перлит (сорбит отпуска, троостосорбит), образца № 7 – зернистый перлит (троостосорбит).

Отличие структур образцов № 4 – 7 состоит в размерах и распределении как первичных карбидов, так и карбидов в феррито-цементитной смеси. Кроме того, с увеличением числа циклов происходит измельчение зерна, коагуляция мелких карбидов и их выделение в направлении первичных мартенситных игл. На микрофотографиях (см. рис. 5) они имеют вид светлых точек и коротких стерженьков, ориентированных в направлении первичных мартенситных игл.

На свойства стали существенное влияние оказывает карбидная неоднородность, которая приводит к уменьшению ее контактной выносливости, неравномерному распределению легирующих элементов, снижению твердости и анизотропии деформации штампов. Карбидная неоднородность стали X12МФ определяется путем сравнения микрофотографий их структуры, полученных при увеличении 100×, с микроструктурами эталонной шкалы, представленной в ГОСТ 5950–2000. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Физико-механические свойства в значительной мере определяются величиной зерна металла. Для определения величины зерна был применен метод сравнения с эталонными шкалами ГОСТ 5950–2000. После просмотра десяти полей зрения каждого шлифа, были установлены баллы зерна (см. табл. 2).

Наиболее важными механическими свойствами штамповых сталей, работающих в условиях горячего деформирования, являются их твердость и ударная вязкость. Измерение твердости производилось на приборе Роквелла с помощью алмазного конуса с углом при вершине 120° и радиусом закругления в вершине конуса 0,2 мм. Суммарная нагрузка составила 1470 Н (150 кгс) (шкала С). В таблице 3 представлены результаты измерения твердости исследуемых образцов.

Измерения ударной вязкости образцов № 2 и 7, проводились на копре РОЕ 2000 Instron, при этом были получены соответственно значения: 0,4 и 0,9 МДж/м<sup>2</sup>.

Повышение ударной вязкости влечет за собой улучшение такого важного для решения поставленной задачи свойства, как разгаростойкость. Таким образом, в результате проведенных исследований путей улучшения структуры стали X12МФ и повышения ее механических свойств разработана технология окончательной термообработки, заключающаяся в термоциклическом воздействии на сталь в диапазоне температур, соответствующих аустенитной (выше точки  $A_{cm} = 860$  °С) и перлитной областям (ниже точки  $Ar_1 = 760$  °С). На основе анализа микроструктур стали X12МФ после различных режимов термообработки доказано:

– в результате термоциклической обработки образуются изолированные дисперсные карбиды глобулярной формы, располагающиеся как по границам аустенитных зерен, так и внутри зерна;

– выделяющиеся карбиды препятствуют росту зерна при нагреве до температуры закалки, что в сочетании с последующей закалкой и отпуском позволяет получить материал с повышенными эксплуатационными свойствами;

Таблица 2

**Результаты анализа  
металлографических  
исследований**

№ образца	Балл зерна	Балл карбидной неоднородности
0	14	8
1		4
2		3
3		
4		
5		
6		2
7		

Таблица 3

**Зависимость твердости стали X12МФ от режима термообработки**

Маркировка образца	Твердость HRC (HB)					Среднее значение, HRC (HB)	Среднее квадратичное отклонение, HRC (HB)	Относительная ошибка, %
	№ измерения							
	1	2	3	4	5			
0	(200)	(205)	(200)	(195)	(200)	(200)	(17,68)	2,0
1	43	44	43	43	44	43	0,71	1,6
2	54	55	53	55	53	54	1,0	2,3
3	44	45	46	46	44	45	0,71	1,7
4	57	58	58	57	57	57	0,71	1,8
5	52	55	54	54	55	54	0,80	1,9
6	53	52	53	54	52	53	0,75	1,7
7	54	53	53	52	53	53	0,69	1,7

– при увеличении числа циклов при термоциклической обработке за счет растворения мелких карбидов в аустените растет концентрация карбидной фазы в феррито-карбидной смеси, а после закалки и высокого отпуска карбиды укрупняются и ориентируются в направлении первичных мартенситных игл.

Результаты производственных испытаний штампа из стали X12MФ, работающего в условиях горячего деформирования и нагревающегося до температуры 500 °С, показали, что стойкость деталей штампа, подвергнутых термоциклической обработке, в 2 раза выше стойкости деталей после обычной закалки и отпуска.

#### *Список литературы*

1. Федюкин, В. К. Термоциклическая обработка сталей и чугунов / В. К. Федюкин. – Л. : Машиностроение, 1977. – 384 с.
2. Гурьев, А. М. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей / А. М. Гурьев [и др.] // Ползуновский вестн. – 2005. – № 2 (ч. 2). – С. 36 – 43.
3. Власова, О. А. Повышение эксплуатационных свойств инструментальных сталей методами термоциклической обработки : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / О. А. Власова. – Барнаул, 2009. – 16 с.
4. Пат. 2192485 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> C21D9/22. Способ термоциклической обработки высокохромистой инструментальной стали на вторичную твердость / Г.А. Околович [и др.]; заявитель и патентообладатель Алтай. гос. техн. университет им. И. И. Ползунова. – № 2000127998/02; заявл. 09.11.00; опубл. 10.11.2002.
5. Computer-Aided Synthesis of Ecologically Safe Processes of Chemicothermal Treatment of Workpieces from Metals / E. N. Malygin [et al.] // Вестн. Тамб. гос. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 3. – С. 518 – 524.

---

### **Thermal Cycling of Hot-Forming Dies Made from X12MФ Steel**

**D. M. Mordasov<sup>1</sup>, S. V. Zotov<sup>2</sup>**

*Department “Materials and Technology”, TSTU (1);  
ООО “Engineering Center Diagnost-T”, (2) Tambov, Russia;  
mit@mail.nnn.tstu.ru*

**Keywords:** hardening; isothermal annealing; microstructure; tempering; thermal cycling; tool steel.

**Abstract:** The paper studies the influence of temperature and time parameters of heat treatment techniques such as austenitizing, annealing and tempering on the structure and properties of X12MФ steel. The procedures for preliminary, first and final heat treatments of the tool steel X12MФ are developed. The dependences of physical-mechanical properties of the X12MФ steel on process parameters of thermal cycling are found. It is shown that with the increase in the number of cycles the concentration of the carbide phase in the ferrite-carbide mix grows. After hardening and high tempering, carbides grow larger and are oriented in the direction of primary martensite needles.



Testing of hot-forming dies made from X12MΦ steel subjected to thermal cycling at a temperature of 500 °C has shown the double increase in the firmness of dies in comparison with the parts exposed to traditional heat treatment.

#### References

1. Fedyukin V.K. *Termotsiklicheskaya obrabotka staley i chugunov* [Thermocyclic treatment of steels and cast irons], Leningrad: Mashinostroenie, 1977, 384 p. (In Russ.)
2. Gur'ev A.M., Voroshnin L.G., Kharaev Yu.P., Lygdenov B.D., Zemlyakov S.A., Gur'eva O.A., Kolyadin A.A., Popova O.V. [Thermal cycling and thermal cycling Chemical-hardening steels], *Polzunovskii vestnik* [Polzunovsky vestnik], 2005, no. 2, part 2), pp. 36-43. (In Russ.)
3. Vlasova O.A. *Extended abstract of candidate's of technical sciences*, Barnaul, 2009, 16 p. (In Russ.)
4. Okolovich G.A., Evtushenko A.T., Gur'ev A.M., Klimov D.A., Okhrimenko S.A., Shilova V.M. Altai. gos. tekhn. universitet im. I. I. Polzunova, *Sposob termotsiklicheskoi obrabotki vysokokhromistoi instrumental'noi stali na vtorichnyuyu tverdosť* [Thermal cycling method of processing high-chromium tool steel on the secondary hardness], Russian Federation, 2002, Pat. 2192485. (In Russ.)
5. Malygin E.N., Nemtinov V.A., Zimnukhova Zh.E., Nemtinova Yu.V. Computer-aided Synthesis of Ecologically Safe Processes of Chemicothermal Treatment of Workpieces from Metals, *Transactions of Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 518-524. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### Thermozyklische Bearbeitung der Stanzen für die Arbeit unter den Bedingungen des heissen Deformierens aus dem Stahl X12MΦ

**Zusammenfassung:** Es ist der Einfluss der temperatur-vorübergehenden Parameter der thermischen Bearbeitung nach dem Regime der Austenisation, des Glühens und des Entlassens auf die Struktur und die Eigenschaften des Stahls X12MΦ untersucht. Es sind die Schemen der vorausgehenden, ersten und definitiven thermischen Bearbeitung des Instrumentalstahls X12MΦ entwickelt. Es sind die Abhängigkeiten der physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Stahls X12MΦ von den technologischen Parameter der thermozyklischen Bearbeitung festgestellt.

Es ist gezeigt, dass die Vergrößerung der Zahl der Zyklen zur Steigerung der Konzentration der Karbidphase in der Ferritkarbidmischung bringt, und nach der Härtung und der hohen Entlassung werden die Karbide vergrößert und werden in der Richtung der primären martensitischen Nadeln orientiert. Die Tests der Stanze aus dem Stahl X12MΦ, die von der thermozyklischen Bearbeitung untergezogen wurde und unter den Bedingungen des heissen Deformierens bei der Temperatur 500 C gearbeitet hat, haben die Erhöhung in 2 Male der Standhaftigkeit der Details der Stanze im Vergleich zu den Details nach der traditionellen thermischen Bearbeitung gezeigt.

---

### Traitement thermocyclique des pilons pour le travail dans un environnement de la déformation chaude de l'acier X12MΦ

**Résumé:** Est étudiée l'influence des paramètres de chaleur et de température du traitement thermique d'après le régime d'austénisation, d'adoucissage et de revenu sur la structure et les propriétés de l'acier X12MΦ. Sont élaborés les schémas du traitement

thermique, préalable, premier et final, de l'acier à outils X12MФ. Sont établies les dépendances des propriétés physiques et mécaniques de l'acier X12MФ des paramètres du traitement thermocyclique. Est montré que l'augmentation du nombre des cycles aboutit à une augmentation de la concentration de la phase au carbide du mélange fer-carbide, et après le durcissement et le revenu les carbides grossissent et s'orientent dans le sens des aiguilles primaires martensitiques. Les essais du pilon en acier X12MФ soumis au traitement thermocyclique ont montré une augmentation de 2 fois de la résistance des pièces du pilon par rapport aux pièces après le traitement thermique traditionnel.

---

**Авторы:** *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; *Зотов Сергей Владимирович* – главный инженер ООО «Инженерный центр «Диагност-Т», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---