

УДК 621.78.011:621.81

МЕТОДЫ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОБЪЕМНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Шматов А.А.*Белорусский национальный технический университет, Минск, e-mail: shmatovalexander@gmail.com*

Настоящая статья посвящена обзору методов термоциклической обработки (ТЦО), получивших применение для упрочнения во всем объеме стальных инструментов. В результате анализа литературных данных установлено, что многократные полиморфные превращения в стали при ТЦО приводят к фазовому наклепу, измельчению микро- и субзеренной структуры, увеличению плотности дислокаций и дефектов кристаллического строения. Такая структура создает преимущественно деформационное (дислокационное) упрочнение во всем объеме стальной матрицы. По назначению все процессы ТЦО делятся на две основные группы: 1) предварительная ТЦО для улучшения структуры перед термической и механической обработкой; 2) упрочняющая ТЦО (УТЦО), формирующая структуру закаленной стали с окончательными рабочими свойствами. В работе предложена новая классификация известных способов УТЦО по различным видам термоциклического упрочнения быстрорежущих и штамповых сталей. УТЦО может проходить с фазовыми или без фазовых превращений, с завершенными или незавершенными структурно-фазовыми превращениями при циклическом нагреве и охлаждении, осуществляться по диффузионному, сдвиговому или смешанному механизмам фазовой перекристаллизации, самостоятельно или вместе с другими видами воздействий. Процессы УТЦО являются наиболее эффективными и экономичными способами повышения стойкости режущих и штамповых металлообрабатывающих инструментов.

Ключевые слова: объемное упрочнение, термоциклическая обработка, стальные инструменты

THERMOCYCLIC TREATMENT METHODS FOR VOLUME STRENGTHENING STEEL TOOLS

Shmatov A.A.*Belarusian National Technical University, Minsk, e-mail: shmatovalexander@gmail.com*

This article is devoted to a review of the methods of thermocyclic treatment (TCT), which have received application for strengthening in the entire volume of steel tools. As a result of the analysis of the literature data, it was found that multiple polymorphic transformations in steel during TCT lead to phase hardening, refinement of the micro- and subgrain structure, and an increase in the density of dislocations and crystal defects. This structure creates predominantly deformation (dislocation) hardening in the entire volume of the steel matrix. All TCT processes are divided into two main application groups: 1) preliminary TCT to improve the structure before thermal and mechanical treatment; 2) strengthening TCT (STCT), which forms the structure of hardened steel with final working properties. A new classification of the known STCT methods on various types of thermocyclic strengthening of high-speed and die steels is proposed in the paper. STCT can take place with or without phase transformations, with completed or incomplete structural and phase transformations during cyclic heating and cooling, carried out by diffusion, shear or mixed mechanisms of phase recrystallization, alone or together with other types of influences. STCT processes are the most effective and economical methods to increase the service life of cutting and stamping metalworking tools.

Keywords: volumetric strengthening, thermocyclic treatment, steel tools

Поверхностная обработка не всегда может повысить работоспособность стальных инструментов, которые испытывают большие динамические нагрузки; в этом случае требуются высокие показатели прочности и трещиностойкости во всем объеме инструментов. В настоящее время самыми эффективными и экономичными способами объемного упрочнения считаются процессы термоциклической обработки (ТЦО), которые улучшают свойства сталей и сплавов за счет «постоянного накопления от цикла к циклу положительных изменений структуры» [1]. В отличие от традиционной термообработки при ТЦО появляются новые источники, оказывающие влияние на изменение структуры сплавов, прежде всего фазовые превращения, температурные градиенты, структурные и термические напряжения [1–3]. Процессы ТЦО имеют много общего с процессами пластической

деформации, в обоих случаях можно создать деформационное (дислокационное) упрочнение. Большое влияние на формирование дислокационной структуры оказывают многократно повторяющиеся фазовые превращения сплавов; они приводят к фазовому наклепу, созданному из-за разницы удельных объемов и модулей упругости образующихся фаз. Фазовый наклеп сопровождается процессами рекристаллизации, что ведет к измельчению всех структурных составляющих. С другой стороны, с увеличением числа циклов проявляется эффект структурной наследственности, направленный на восстановление исходного состояния и снижение деформационного упрочнения. Как отмечено в работах [3–5], при ТЦО сплавов происходят следующие структурные изменения:

1. Диспергирование элементов микро- и субмикроструктуры, сфероидизация

хрупких избыточных фаз (карбидов) и других структурных составляющих. Процессу диспергирования способствуют процессы пластической деформации и рекристаллизации, проходящие при ТЦО. Важнейшим рычагом дробления кристаллов является трещинообразование в хрупких избыточных фазах. В местах выхода дислокаций и субзеренных границ преимущественно растворяются избыточные фазы; нерастворившиеся фазы являются подложкой для повторного выделения этих фаз из пересыщенного твердого раствора. Явление сфероидизации идет наряду с коагуляцией избыточных фаз за счет внутривзеренной и зернограничной диффузии.

2. Увеличение плотности точечных и линейных дефектов кристаллической структуры. Высокая концентрация точечных дефектов интенсифицирует диффузионные процессы, что приводит к обогащению твердого раствора легирующими элементами, повышению химической однородности сплава. Избыток вакансий ускоряет распад пересыщенного твердого раствора. При высокой плотности дислокаций на границах зерен, субзерен и первичных фаз со скоплениями вакансий создается деформационное упрочнение сплавов в результате формирования полей структурных и термических напряжений.

3. Немонотонность изменения свойств сплавов в зависимости от числа циклов, вызванная конкуренцией двух факторов, формирующих определенный тип структуры. Усиление деформационной компоненты сопровождается повышением количества различных дефектов кристаллического строения (вакансий, дислокаций); напротив, на стадии формирования субструктуры, особенно при фрагментации, плотность дислокаций снижается.

По назначению все процессы ТЦО сталей и сплавов можно условно разде-

лить на две основные группы: 1) предварительная ТЦО для улучшения структуры перед термической и механической обработкой [1, 6, 7]; 2) упрочняющая ТЦО (УТЦО), формирующая структуру закаленной стали с окончательными рабочими свойствами [8]. Согласно классификации В.К. Федюкина [2] процессы ТЦО имеют много разновидностей (рис. 1, 2).

ТЦО может проходить с фазовыми или без фазовых превращений, с завершенными или незавершенными структурно-фазовыми превращениями при циклическом нагреве и охлаждении, осуществляться по диффузионному, сдвиговому или смешанному механизмам фазовой перекристаллизации, отдельно или в сочетании с другими видами воздействий (рис. 1), а сами процессы выполняют по схемам маятниковой, средне-, высоко- и низкотемпературной ТЦО (рис. 2). Маятниковая ТЦО представляет собой циклический печной нагрев до температуры на 30–50 °С выше точки A_{c1} с последующим охлаждением на воздухе до температуры на 50–80 °С ниже A_{r1} . При среднетемпературной ТЦО проводят циклический нагрев до температуры на 30–50 °С выше A_{c1} с последующим охлаждением на воздухе до температуры на 50–80 °С ниже A_{r1} и затем охлаждением в воде или масле. Высокотемпературную ТЦО осуществляют путем циклического электронагрева сталей со скоростью 30–50 °С/с до температуры полной аустенизации и быстрого охлаждения до температуры наименьшей устойчивости аустенита (420–450 °С) и выдержки при ней до полного его превращения, а на последнем цикле осуществляют закалку на мартенсит. При низкотемпературной ТЦО проводят многократный нагрев на 30–50 °С ниже точки A_{c1} с последующим охлаждением в воде (масле). Эти процессы ТЦО практически не применяют для инструментальных сталей [1].



Рис. 1. Классификация видов ТЦО [1]

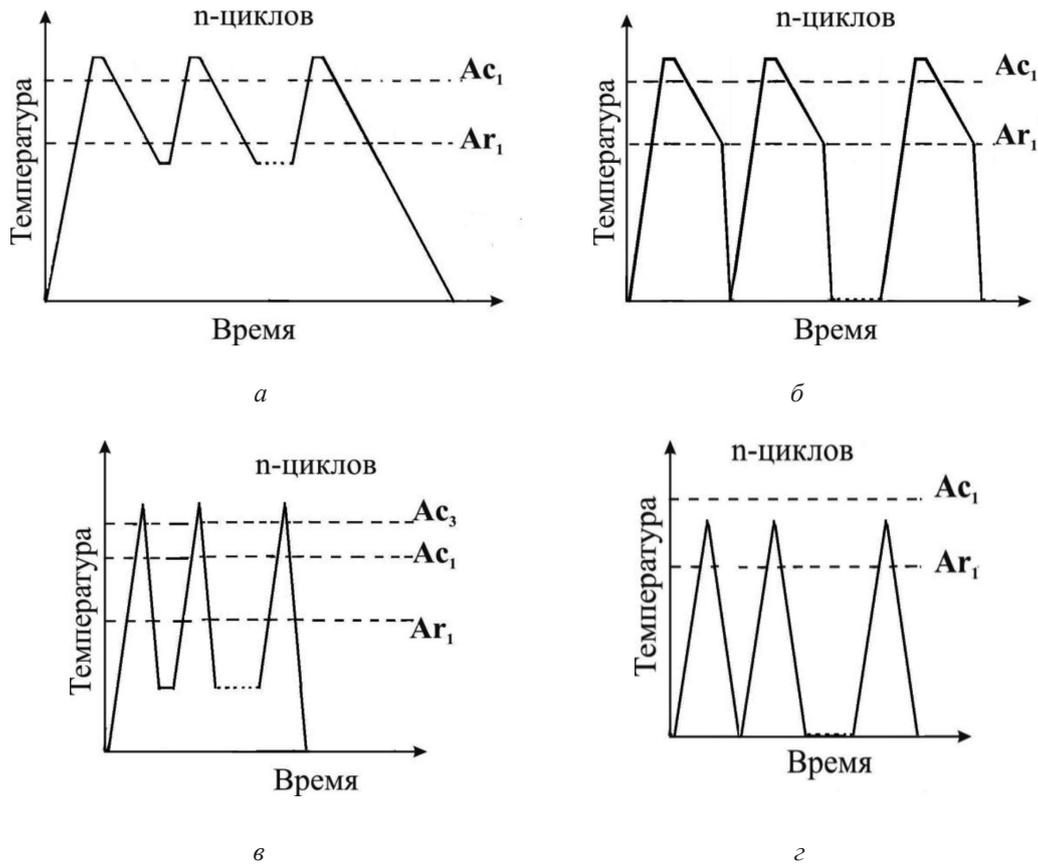


Рис. 2. Схемы ТЦО сталей и сплавов [1]: а – маятниковая ТЦО, б – среднетемпературная ТЦО, в – высокотемпературная ТЦО, г – низкотемпературная ТЦО

По мнению зарубежных и отечественных ученых процессы УТЦО являются наиболее эффективными способами термоциклической обработки, повышающей стойкость инструментов [8–10]. Изученные в настоящей работе процессы УТЦО режущих и штамповых металлообрабатывающих инструментов имеют много вариантов, которые отличаются от стандартной термообработки (закалки и отпуска) термоциклическими режимами и последовательностью выполнения операций [11–13].

По технологическому признаку все известные процессы УТЦО (табл. 1) можно условно разделить на три основные группы [8], в которых: 1) термоциклирование предшествует окончательной термической обработке, причем термоциклирование можно совмещать или не совмещать с закалкой; 2) термоциклирование осуществляют после окончательной термической обработки; 3) термоциклирование следует за пластической деформацией и окончательной термической обработкой. В табл. 1 термин «термоциклирование» представляет собой любое много-

кратное чередование операций нагрева и охлаждения. В этом случае процессы многократной закалки, отжига, нормализации и другие термоциклические режимы в сочетании с термообработкой (закалкой и отпуском) можно полноправно отнести к УТЦО, формирующей структуру с окончательными рабочими свойствами инструментов. При этом словосочетание «термоциклирование, совмещенное с закалкой», означает, что с верхней температуры последнего термоцикла осуществляют закалочное охлаждение, а выражение «термоциклический отжиг с промежуточным перлитным превращением» означает, что на последнем цикле осуществляют медленное охлаждение до комнатной температуры. В изученных процессах УТЦО термоциклирование инструментальных сталей может проходить с завершенными превращениями или при отсутствии таковых, а промежуточные фазовые превращения при циклическом охлаждении могут протекать по мартенситному, перлитному или бейнитному механизмам [8, 14].

Таблица 1

Известные способы УТЦО инструментальных сталей [8]

Технологические операции
1. Термоциклирование с промежуточным перлитным превращением, совмещенное с закалкой на бейнит + отпуск
2. Термоциклирование с промежуточным бейнитным превращением, совмещенное с закалкой на бейнитно-мартенситную структуру + отпуск
3. Многократная закалка на мартенсит + отпуск
4. Термоциклирование с промежуточным мартенситным превращением, совмещенное с закалкой на мартенсит + отпуск
5. Многократная закалка на мартенсит с промежуточным отпуском + отпуск
6. Многократная закалка на мартенсит с промежуточным многократным нагревом ниже A_1 с последующим резким охлаждением + отпуск
7. Термоциклический отжиг с промежуточным перлитным превращением + закалка на мартенсит + отпуск
8. Многократный отжиг + закалка на мартенсит + отпуск
9. Многократная нормализация + закалка на мартенсит + отпуск
10. Термоциклирование с промежуточным перлитным превращением, совмещенное с закалкой на мартенсит + отпуск
11. Термоциклирование с бейнитным превращением, совмещенное с закалкой на мартенсит + отпуск
12. Термоциклирование вокруг точки A_1 без распада аустенита при охлаждении, совмещенное с закалкой на мартенсит + отпуск
13. Термоциклирование выше A_{12} , совмещенное с закалкой на мартенсит + отпуск
14. Многократный нагрев ниже A_1 с последующим резким охлаждением + закалка на мартенсит + отпуск
15. Закалка на мартенсит + отпуск + многократный нагрев ниже A_1 с последующим резким охлаждением
16. Пластическая деформация + закалка на мартенсит + отпуск + многократный нагрев ниже A_1 с последующим резким охлаждением

Таблица 2

Результаты изучения инструментальных сталей после УТЦО [9]

Структура	Свойства
на основе отпущенного мартенсита или бейнита	физико-химические, механические, технологические
Увеличение плотности дислокаций	Повышение ударной вязкости
Снижение степени тетрагональности мартенсита	Повышение прочности (при изгибе, растяжении)
Повышение напряжений 2-го рода	Повышение твердости
Измельчение зерен и субзерен	Повышение износостойкости
Уменьшение блоков мозаики	Увеличение теплостойкости и термостойкости
Уменьшение размера карбидов	Повышение коррозионной стойкости
Увеличение количества вторичных дисперсных карбидов	Повышение контактной выносливости
Повышение степени легирования и однородности твердого раствора	Увеличение периода стойкости инструмента
Устранение структурной полосчатости	Снижение температур критических точек
	Повышение изотропности свойств
	Уменьшение деформации
	Устранение закалочных микротрещин

Анализ (табл. 2) показал, что инструментальные стали упрочняют не всеми известными способами УТЦО: быстрорежущие стали – способами под номерами 3, 5, 7, 13, 14; а штамповые стали – практически всеми, кроме 13 и 14. Для быстрорежущих сталей наилучшим по достигаемому эффекту является процесс УТЦО, включающий 5–7 циклов многократного нагрева до полной их аустенизации при температуре на 20–50 °С ниже температуры плавления

и термоциклического охлаждения с выдержкой при 800–850 °С (выше точки A_1), закалку, совмещенную с последним термоциклическим нагревом, и трехкратный отпуск (560 °С по 1 ч). Для ударно-штамповых сталей (У8–У12) наилучшим является способ УТЦО, включающий термоциклирование (пять циклов) в интервале температур от 740 до 800 °С с изотермическими выдержками при этих температурах для полного завершения фазовых пре-

вращений сталей, закалочное охлаждение в воде с верхней температуры термоцикла и низкий отпуск при 180°C. Однако подавляющее большинство известных процессов УТЦО инструментальных сталей имеет такой недостаток, что каждый цикл УТЦО проводят с полностью завершёнными структурно-фазовыми превращениями для измельчения и гомогенизации структуры во всем объеме инструмента. Это не позволяет сформировать наиболее работоспособную структуру инструментальной стали с градиентом химического состава и свойств по сечению инструмента, когда на его поверхности создаются более высокие показатели твердости и износостойкости, а в сердцевине инструмента – более высокие значения вязкости и прочности.

В результате применения УТЦО инструментальных сталей (табл. 2) существенно улучшается микро- и макроструктура инструментальных сталей, что положительно сказывается на увеличении целого комплекса важных эксплуатационных и технологических характеристик металлообрабатывающих инструментов [15–17].

Заключение

Поверхностная обработка не всегда может повысить работоспособность стальных инструментов, которые испытывают большие динамические нагрузки; поэтому так важно развивать технологии объемного упрочнения, чтобы обеспечить высокие показатели прочности и трещиностойкости во всем объеме инструментов. В этом плане большой интерес представляет метод термоциклической обработки, который создает деформационное (дислокационное) упрочнение в инструментальных сталях, приводит к их фазовому наклепу, диспергированию элементов микро- и субзеренной структуры. Среди известных технологий термоциклической обработки наиболее перспективным считается процесс упрочняющей термоциклической обработки, формирующей мелкоизмельченную структуру закаленной стали с окончательными рабочими свойствами высокого уровня. Благодаря своей простоте, технологичности и эффективности использование данной технологии упрочняющей термоциклической обработки на практике позволит решить важнейшую проблему повышения работоспособности стальных металлообрабатывающих инструментов.

Список литературы

1. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.

2. Лыгденов Б.Д., Хараев Ю.П., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. Термоциклирование. Структура и свойства. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. 251 с.

3. Гурьев А.М. Экономно-легированные стали для литых штампов горячего деформирования и их термоциклическая и химико-термоциклическая обработка: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01. Томск, 2001. 487 с.

4. Ткаченко Г.А. Конструкционная прочность и структурообразование углеродистых сталей при термоциклической обработке // Респ. Межведом. сб. науч. тр. Metallurgia / БНТУ. 2011. Вып. 33. Ч. 2. С. 119–133.

5. Югай С.С., Закирова М.Г., Абляз Т.Р. Диспергирование низкоуглеродистой мартенситной стали методом интенсивной термоциклической обработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4. С. 1347–1350.

6. Пантелеев И.А. Разработка режимов термоциклического отжига заготовок из быстрорежущих сталей с целью улучшения технологической пластичности: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09. Москва, 2011. 136 с.

7. Косихина М.С. Эффективность термоциклической обработки шарикоподшипниковых сталей // Всероссийская научно-техническая конференция Студенческая научная весна 2014: Машиностроительные технологии [Электронный ресурс]. URL: <http://studvesna.qform3d.ru> (дата обращения: 24.06.2021).

8. Шматов А.А. Научные и технологические основы термомеханических и термоциклических методов упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01 и 05.02.07. Минск, 2020. 344 с.

9. Норхужаев Ф.Р., Эргашев Д.М. Термоциклическая обработка нетеплостойких инструментальных сталей // Universum: технические науки: электрон. Научн. журн. 2020. № 11 (80). [Электронный ресурс]. URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/10923> (дата обращения: 24.06.2021).

10. Иващенко В.Ю., Чейлях А.П. Использование термоциклирования для обработки штампов // Вістник Приазовського державного технічного університету. 2011. Вып. 22. № 3. С. 108–112.

11. Мордасов Д.М., Зотов С.В. Термоциклическая обработка штампов для работы в условиях горячего деформирования из стали X12MФ // Вестник ТГТУ. 2016. Т. 22. № 3. С. 481–490.

12. Борисова С.А., Комарова Т.В. Термоциклическая обработка инструментальной стали У12 // Материаловедение и металлургия Нижегород. гос. техн. ун-та. 2005. Т. 50. С. 245–247.

13. Шматов А.А. Способ термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали // Патент РФ № 2563382. Патентообладатель Шматов А.А. 2015. Бюл. № 26.

14. Шматов А.А., Жилинский О.В., Фомихина И.В., Лактюшина Т.В., Марочкина С.И. Проектирование процесса термоциклической обработки стали Р6М5 с помощью компьютерных синтез-технологий // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. 2009. № 8. С. 19–25.

15. Власова О.А. Повышение эксплуатационных свойств инструментальных сталей методами термоциклической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. Барнаул, 2009. 186 с.

16. Свеклин А.П., Горщикова Т.А., Хлыбов А.А. Термоциклическая обработка как метод повышения механических свойств инструментальных сталей // Sword: технические науки [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sword.com.ua/index.php/ru/conference/the-content-of-conferences/archives-of-individual-conferences/june-2014> (дата обращения: 24.06.2021).

17. Братухин А.В. Повышение износостойкости инструментальных сталей при изготовлении авиационного крепежа с использованием лазерного термического упрочнения: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. Нижний Новгород, 2020. 132 с.