

ОПТИМИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ P18

*Кандидаты техн. наук ШМАТОВ А. А., ФОМИХИНА И. В., ЖИЛИНСКИЙ О. В.,
ЛАКТЮШИНА Т. В., инж. МАРОЧКИНА С. И.*

*Белорусский национальный технический университет,
ГНУ «Институт порошковой металлургии»,
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова*

Метод упрочняющей термоциклической обработки (УТЦО) формирует структуру сталей и сплавов с повышенными рабочими свойствами [1, 2]. В отличие от традиционной при термоциклической обработке появляются дополнительные источники воздействия на структуру стали, основные из которых – фазовые превращения, градиенты температур, термические и межфазовые напряжения. Все указанные факторы воздействия могут быть реализованы как в комплексе, так и по отдельности. Большое влияние на формирование дислокационной структуры сталей при термоциклической обработке оказывают их полиморфные превращения. Многократное повторение операций нагрева и охлаждения при УТЦО выше и ниже температуры фазовых превращений приводит к фазовому наклепу обрабатываемого сплава из-за разницы объемов и модулей упругости образуемых фаз [1, 2]. Фазовый наклеп сопровождается процессами рекристаллизации, которые от цикла к циклу повторяются, что способствует измельчению всех составляющих структуры сталей. При этом проявляется эффект структурной наследственности, который позволяет от цикла к циклу накапливать структурные изменения сплавов. Окончательная операция закалки после ТЦО, проходящая с мартенситным превращением, формирует структуру матрицы, насыщенной дефектами кристаллической решетки [1, 2]. В результате УТЦО достигаются уменьшение размера зерен и блоков мозаики, увеличение плотности дислокаций, измельчение карбидов, повышение однородности и степени легирования твердого раствора, снижение степени тетрагональности мартенсита и др.

Эти позитивные структурные изменения существенно улучшают эксплуатационные свойства инструмента. В частности, УТЦО повышает вязкость, прочность, твердость, теплостойкость, контактную выносливость, износостойкость сталей, изотропность свойств и уменьшает деформацию изделий по сравнению с традиционной термообработкой [1–4].

Большую помощь исследователю при выборе оптимального варианта проведения процесса УТЦО быстрорежущей стали могут оказать математические методы планирования экспериментов. В материаловедении традиционно решают прямые задачи, когда на основании минимального количества экспериментов, проведенных согласно плану экспериментов, определяют свойства материала, затем рассчитывают математические модели, описывающие влияние факторов и их взаимодействий, и с помощью графических изображений выбирают оптимальные параметры процесса [5]. Но этот подход не может решить всего комплекса вопросов, возникающих при проектировании технологии, поскольку функционирование любой технологической системы (в данном случае таковой является технология УТЦО быстрорежущей стали P18) происходит в условиях постоянного случайного изменения значений параметров системы под влиянием различных внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Сами технологические системы как объекты проектирования обладают рядом специфических особенностей: многокритериальностью, многопараметричностью, стохастичностью (рассеивание параметров), наличием нелинейных внутрисистемных связей и т. д. При

исследовании, проектировании и освоении таких объектов требуется решение не только прямых, но и обратных задач, когда исследователь заранее задает комплекс необходимых свойств материала, показателей качества технологии и с помощью компьютерного моделирования находит оптимальные температурно-временные параметры процесса. Такой методологический подход, получивший название многомерного проектного синтеза технологической системы, успешно применяется при разработке новых технологий и материалов [6].

Цель данной работы – оптимизация и компьютерное проектирование технологии УТЦО быстрорежущей стали Р18 с применением наукоемких синтез-технологий метода многомерного проектного синтеза технических объектов, материалов и технологий.

Объекты и методика исследований. В настоящей работе разработан [7, 8] и исследован технологический процесс УТЦО быстрорежущей стали Р18, который в отличие от традиционной термообработки (рис. 1) включает в себя многократные нагрев и охлаждение стали выше и ниже критической точки A_1 с окончательным закалочным охлаждением на последнем цикле и последующим традиционным трехкратным отпуском (рис. 2).

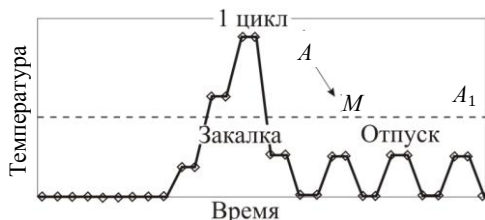


Рис. 1. Диаграмма традиционной термической обработки быстрорежущей стали

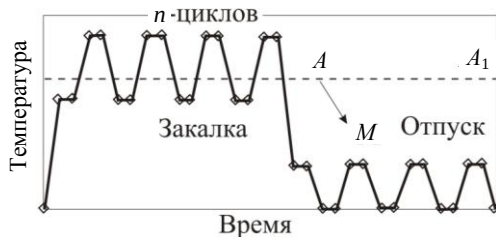
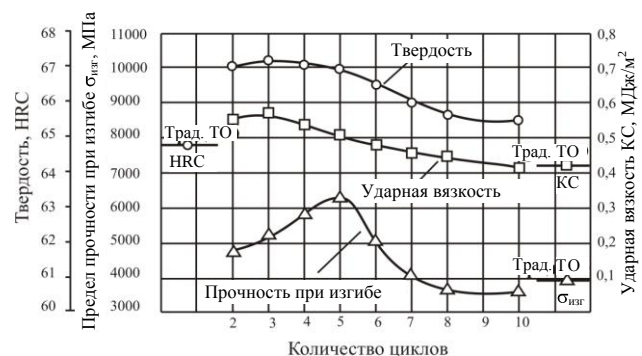


Рис. 2. Диаграмма УТЦО быстрорежущей стали, включающая в себя термоциклирование выше и ниже критической точки A_1 с закалочным охлаждением на последнем цикле и отпуском

Процесс УТЦО изучали на быстрорежущей стали Р18 (18 % W), которая наряду с другими быстрорежущими сталями широко используется на практике.

При исследовании процесса УТЦО варьировали температуру охлаждения, время нагрева и охлаждения, а также число циклов. Причем в каждом цикле при УТЦО время нагрева и охлаждения, а также максимальная (при нагреве) и минимальная (при охлаждении) температуры были постоянными. Максимальная температура-

ра термоцикла при УТЦО стали Р18 соответствовала температуре ее нагрева под закалку 1270 °С, а минимальную температуру термоцикла варьировали, не понижая ее ниже 750 °С. Процесс термоциклирования стали Р18 осуществляли в двух печах-ваннах следующим образом: сначала образцы подогревали при температуре 800 °С в течение 30 мин, затем загружали в ванну с максимальной температурой, выдерживали необходимое время в ней и переносили в ванну с минимальной температурой, выдерживали в ней необходимое время, затем такой процесс повторяли. С последнего цикла нагрева образцы закалывали путем их переноса в ванну с температурой 560 °С, где выдерживали 1 мин, и охлаждали на воздухе. Затем образцы отпускали при температуре 560 °С в течение 1 ч три раза (рис. 3). Для термоциклического нагрева использовали расплав солей состава 95 % $BaCl_2$ + 5 % MgF_2 , для термоциклического охлаждения – расплав состава 30 % $BaCl_2$ + 15 % $NaCl$ + 55 % $CaCl_2$, а изотермическую закалку и отпуск проводили в селитровой ванне на основе 50 % KNO_3 + 50 % $NaNO_2$. Все процессы УТЦО были выполнены



на стандартном термическом оборудовании.

Рис. 3. Влияние количества циклов при УТЦО на свойства быстрорежущей стали Р18. Режим УТЦО: ТЦО 1270 °С – 750 °С с последующей закалкой + отпуск 560 °С, 1 ч, три раза

Сравнительные испытания механических свойств быстрорежущей стали Р18 после УТЦО и стандартной термообработки проводили на специальных образцах: для определения ударной вязкости использовали образцы размером 10×10×55 мм без надреза, прочности на изгиб – образцы размером 5×10×55 мм; определение твердости по Роквеллу осуществляли на поверхности упомянутых выше образцов.

При проектировании процесса УТЦО стали Р18 применяли синтез-технологии метода многомерного проектного синтеза технологических объектов, материалов и технологий в виде базовой компьютерной программы «СИНТЕЗ МК» [6]. Предлагаемый метод позволяет оперировать не только математическими, но и техническими критериями оптимальности. Для реализации процедур многомерного проектного синтеза технологической системы при проведении УТЦО быстрорежущей стали Р18 использован комплекс новых методов, наиболее значимыми из которых являются: метод решения обратных многокритериальных задач, метод компьютерного выбора технически оптимального варианта, метод выделения областей устойчивости исследуемой технологической системы в многомерном пространстве технологических параметров и метод построения графического изображения состояний технологической системы. Все процедуры многомерного синтеза системы выполняет компьютер. Исследователю необходимо поставить задачу проектирования в виде требований к уровню достигаемых свойств и выполнить эксперимент.

Метод многомерного проектного синтеза технологической системы в отличие от известных методов [5] имеет более широкие возможности и позволяет:

- выбрать технически оптимальный вариант, обладающий наибольшей устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов производства;
- одновременно решать обратные многокритериальные задачи: выделение в пространстве состояний областей устойчивости, где «существуют» варианты материала с заданными

свойствами, и выбор технически оптимального варианта технологической системы в одной из областей устойчивости при условии обеспечения требуемого уровня воспроизводимости свойств материала;

- выбрать область устойчивого состояния системы, в которой одновременно достигаются и стабильно воспроизводятся заданные свойства материала.

Результаты исследований. На основании предварительных исследований сталь Р18 имеет лучшие показатели твердости и прочности при четырех-пяти термоциклах УТЦО, а ударная вязкость этой быстрорежущей стали сохраняет высокий уровень при двух-пяти термоциклах УТЦО (рис. 3). Для сравнения, после традиционной термообработки ударная вязкость стали Р18 составила 0,41 МДж/м², ее прочность при изгибе – 3980 МПа, а твердость HRC – 64,5. Микроструктуры быстрорежущей стали Р18 после традиционной термообработки и УТЦО представлены на рис. 4.

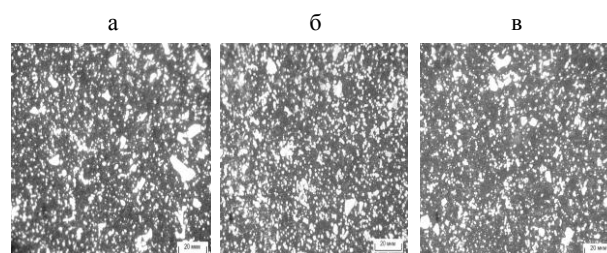


Рис. 4. Микроструктуры быстрорежущей стали Р18 после УТЦО и традиционной ТО (×500). Режим УТЦО: ТЦО 1270 °С – 750 °С с последующей закалкой + отпуск 560 °С, 1 ч, три раза после: а – традиционной ТО; б – трех термоциклов УТЦО; в – пяти термоциклов УТЦО

Следующий этап исследований – оптимизация и компьютерное проектирование процесса УТЦО. Для этого проводили термоциклическую обработку быстрорежущей стали Р18 с пятью термоциклами и неполной термоциклической выдержкой как более приемлемыми параметрами процесса (рис. 3). Сравнительные данные по твердости, ударной вязкости и прочности термоциклически обработанной стали Р18, полученные при реализации 10 опытов плана экспериментов [5], представлены в табл. 1.

На основании экспериментальных данных рассчитаны линейные и нелинейные математи-

ческие модели, описывающие влияние температурно-временных параметров на свойства

термоциклированной стали Р18.

Таблица 1

Результаты исследования твердости, ударной вязкости и прочности быстрорежущей стали Р18 после УТЦО

Номер опыта	Фактор			Отклик		
	Время выдержки при максимальной температуре, с	Время выдержки при минимальной температуре, с	Нижняя температура термоцикла, °С	Твердость HRC	Ударная вязкость КС, МДж/м ²	Предел прочности при изгибе $\sigma_{из}$, МПа
Условное обозначение	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3
Основной уровень (0)	70	150	780			
Интервал варьирования	40	60	30			
Верхний уровень (+1)	110	210	810			
Нижний уровень (-1)	30	90	750			
1	+	+	+	65	0,46	4180
2	–	+	+	65	0,47	4270
3	+	–	+	65,5	0,44	4130
4	–	–	+	65,5	0,49	4850
5	+	+	–	67	0,58	6220
6	–	+	–	66,5	0,56	6940
7	+	–	–	65,5	0,53	6260
8	–	–	–	66	0,52	7530
9	0	0	0	65,5	0,46	4410
10	0	0	0	65,5	0,43	4290

Однако линейные модели оказались неадекватными. Адекватными признаны только нелинейные многокритериальные математические модели следующего вида:

$$Y_1 = 223,41 - 0,01X_1 + 0,16X_2 - 0,42X_3 + 520837,06X_1X_2 - 3,88X_1X_3 - 0,01X_2X_3 + 0,01X_3^2;$$

$$Y_2 = 416,99 + 0,07X_1 + 0,05X_2 - 1,06X_3 + 0,01X_1X_2 - 0,01X_1X_3 - 0,01X_2X_3 + 0,01X_3^2;$$

$$Y_3 = 854216,1 - 113,84X_1 - 12,13X_2 - 2125,63X_3 + 0,06X_1X_2 + 0,12X_1X_3 + 0,01X_2X_3 + 1,33X_3^2,$$

где Y_1 – твердость по Роквеллу; Y_2 – ударная вязкость; Y_3 – прочность на изгиб; X_1 – время выдержки при максимальной температуре термоцикла; X_2 – то же при минимальной температуре термоцикла; X_3 – минимальная температура термоцикла.

Из-за многокритериальности, стохастичности и нелинейности технологической системы «процесс УТЦО быстрорежущей стали Р18» прогнозирование ее поведения усложняется. У каждого реального объекта значения параметров отличаются от расчетных и случайным образом распределены в поле рассеивания. Вследствие этого нет гарантии полного попадания точек оптимизации реальной системы в область устойчивости, найденной исходя из условий «математической устойчивости», т. е.

не всегда можно улучшить свойства материала до заданного уровня свойств. Чтобы такого не произошло при проектировании технологического процесса предусмотрен определенный запас устойчивости системы. Его наличие позволяет избежать часто возникающее ухудшение качества функционирования системы по критерию воспроизводимости свойств материала.

При традиционной методологии выбора оптимальных технологических параметров решения технологических задач проектирования системы не совсем корректны, поскольку в большинстве случаев процессы рассматриваются как детерминированные, т. е. проходящие при соблюдении точных значений параметров технологической системы. В действительности детерминированных систем не существует, так как значения параметров реальных технологических систем всегда являются случайными, а сами системы – стохастическими. Выбор технически оптимального варианта УТЦО стали Р18 осуществляли методами компьютерной методологии проектирования технологических систем, которая предназначена для решения нелинейных и стохастических задач при наличии взаимосвязанных, часто противоречивых требований к свойствам материала и показателям качества системы.

Компьютерное проектирование технологии УТЦО быстрорежущей стали Р18 с помощью базовой программы «СИНТЕЗ МК» осуществ-

ляли в несколько этапов. Результаты компьютерного выбора технически оптимального варианта изучаемой технологической системы (процесса УТЦО стали Р18) сведены в табл. 2, 3. При решении обратной многокритериальной задачи необходимо задать желаемые уровни показателей свойств термодинамически упрочненной стали Р18 (табл. 4).

Таблица 2

Оптимальные параметры процесса УТЦО стали Р18 и поля их рассеивания

Параметр процесса	Номинальное значение	Разрешенные поля рассеивания
Минимальная температура, °C	751	11
Время выдержки при максимальной температуре, с	65	34
Время выдержки при минимальной температуре, с	172	49

Таблица 3

Оптимальные показатели свойств стали Р18 после УТЦО и поля их рассеивания

Оптимальный показатель свойств	Номинальное значение	Поле рассеивания
Ударная вязкость КС, МДж/м ²	0,55	0,06
Прочность при изгибе $\sigma_{\text{из}}$, МПа	6611	1221
Твердость HRC	66,4	0,7

Таблица 4

Заданные границы свойств стали Р18 после УТЦО

Желаемый показатель свойств	Минимальное значение	Максимальное значение
Ударная вязкость КС, МДж/м ²	0,48	0,60
Прочность при изгибе $\sigma_{\text{из}}$, МПа	6000	7300
Твердость HRC	65	67

Результаты виртуальных испытаний работоспособности технологической системы в условиях влияния дестабилизирующих факторов производства приведены в табл. 5.

Таблица 5

Определение запаса работоспособности системы по входным параметрам

Параметр процесса	Значение параметра	Значение производственного допуска	Поле производственного допуска	Коэффициент работоспособности
Минимальная температура, °C	751	±5	10	1,1
Время выдержки при максимальной температуре, с	65	±5	10	3,4

ре, с				
Время выдержки при минимальной температуре, с	172	±5	10	4,9

Для графической интерпретации результатов, полученных при решении задач исследования и проектирования технологии УТЦО быстрорежущей стали Р18, построены дискретные портреты, отображающие возможные состояния изучаемой технологической системы (рис. 5).

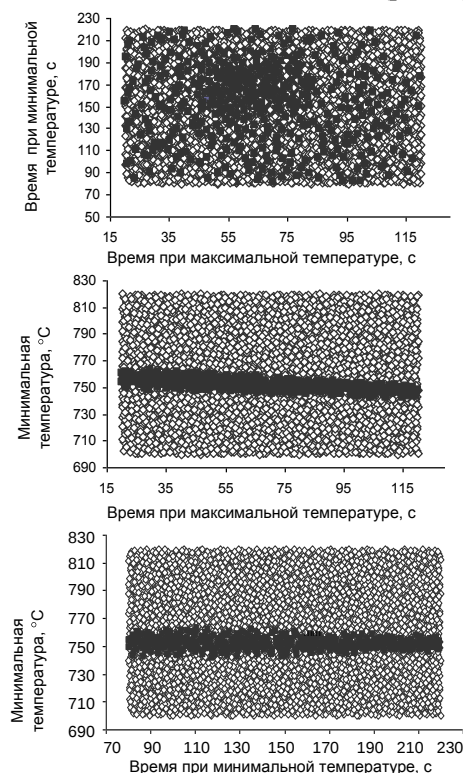


Рис. 5. Дискретные портреты виртуального пространства технологической системы процесса УТЦО стали Р18: ♦ – вариант системы, обеспечивающий заданные свойства; ◊ – то же, не обеспечивающий заданные свойства

Выделение областей устойчивости в многомерном пространстве состояний является важной частью оценки качества технологической системы и выбора технически оптимального варианта системы. В качестве критериев выступают одновременно несколько свойств: ударная вязкость с желаемым уровнем: 0,48–0,60 МДж/м², прочность на изгиб с желаемым уровнем: 6000–7300 МПа; твердость HRC – не ниже 65 (табл. 4). Из рис. 5 видно, что технология УТЦО стали Р18 реализуется с высокими свойствами только тогда, когда система попадает в области устойчивости, отмеченные темными точками. Выход одного или нескольких температурно-временных параметров за пределы об-

ластей устойчивости в области, отмеченные светлыми точками, свидетельствует о том, что материал с заданными свойствами в этом случае не будет получен.

В результате решения задачи проектирования технологической системы «процесс УТЦО быстрорежущей стали Р18» были установлены фактические показатели свойств термоциклически обработанной стали Р18 (табл. 6), стопроцентный уровень воспроизводимости которых достигается при точном соблюдении параметров процесса УТЦО в пределах производственных допусков (табл. 5).

Таблица 6

Фактические показатели свойств стали Р18 после УТЦО и границы их рассеивания по результатам виртуальных испытаний технологической системы

Показатель свойств	Номинальное значение	Границы рассеивания показателей свойств	
		Нижняя	Верхняя
Ударная вязкость КС, МДж/м ²	0,55	0,52	0,58
Прочность при изгибе $\sigma_{0,2}$, МПа	6618	6010	7216
Твердость HRC	66,4	66,1	66,7

Применение результатов исследований.

Результаты промышленных испытаний свидетельствуют о том, что упрочняющая термоциклическая обработка режущего инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали Р18, позволяет увеличить его стойкость в 1,5–6,3 раза по сравнению с традиционной термообработкой (табл. 7).

Таблица 7

Результаты испытаний режущего инструмента из стали Р18 после УТЦО

Вид инструмента	Повышение износостойкости инструмента K_W
Фрезы	1,6–6,3
Сверла	1,8–4,2
Развертки, зенкеры	1,5–4,0
Метчики	2,0–4,5
Протяжки	1,8–2,6

Многочисленные лабораторные и производственные испытания режущего инструмента из быстрорежущих сталей показали, что технология УТЦО наиболее эффективна для инструмента, предназначенного для резания труднообрабатываемых (нержавеющих, жаропрочных, титановых) сплавов, для тонкого инструмента и инструмента, испытывающего ударные

нагрузки (при фрезеровании, черновой механической обработке и пр.).

Инструмент из быстрорежущих сталей, подвергнутый УТЦО, может обрабатывать стали и сплавы с твердостью до HRC – 42–45 и в некоторых случаях заменить дорогостоящий твердосплавный инструмент. Применяя способ УТЦО, можно повысить производительность стального режущего инструмента до 30 %. Процесс УТЦО быстрорежущих сталей успешно использован на предприятиях Беларуси и России.

ВЫВОДЫ

1. Проведены математическое моделирование и компьютерное проектирование процесса УТЦО быстрорежущей стали Р18 с помощью компьютерных синтез-технологий метода многомерного проектного синтеза технических объектов, материалов и технологий. Определены технически оптимальные режимы для реализации процесса в производстве.

2. Процесс упрочняющей термоциклической обработки быстрорежущей стали Р18 повышает ее прочность и вязкость, что позволяет по сравнению с традиционной термообработкой увеличить стойкость режущего инструмента в 1,5–6,3 раза.

3. Разработанная технология УТЦО быстрорежущих сталей наиболее эффективна для инструмента, предназначенного для резания труднообрабатываемых сплавов, для тонкого инструмента и инструмента, испытывающего ударные нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Федюкин, В. К.** Научное обоснование и разработка технологий улучшающей термоциклической обработки металлических материалов: дис. ... докт. техн. наук / В. К. Федюкин. – СПб., 1993. – 323 с.
2. **Гурьев, А. М.** Экономнолегированные стали для литых штампов горячего деформирования и их термоциклическая и химико-термическая обработка: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01 / А. М. Гурьев; Ин-т физ. прочн. и материаловед. СО РАН. – Томск, 2001. – 43 с.
3. **Способ** термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали: пат. 2010870 РФ, МПК5 C21D 9/22 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин, заяв. А. А. Шматов. – № 4790444; заявл. 21.02.90; опубл. 15.04.94 // Открытия. Изобрет. – 1994. – № 7.
4. **Способ** термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали: а. с. 1837079 СССР, МКИ5 C21D 9/22 / А. А. Шматов, Л. Г. Ворошнин, А. В. Щеголов, заяв. они же. – № 4725981; заявл. 21.08.89; опубл. 13.10.92 // Открытия. Изобрет. – 1991. – № 45.
5. **Новик, Ф. С.** Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Раздел IV / Ф. С. Новик. – М.: МиСИС, 1971. – 148 с.

6. Витязь, П. А. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования / П. А. Витязь, О. В. Жилин-

ский, Т. В. Лактюшина // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – С. 3–11.

Поступила 12.02.2009