

УДК 621.78.001,621.81

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ Р6М5 С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИНТЕЗ-ТЕХНОЛОГИЙ

*канд. техн. наук А.А. ШМАТОВ, канд. техн. наук О.В. ЖИЛИНСКИЙ,
канд. техн. наук И.В. ФОМИХИНА, канд. техн. наук Т.В. ЛАКТЮШИНА, С.И. МАРОЧКИНА
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Приведены результаты исследования свойств быстрорежущей стали Р6М5 (6 % W, 5 % Mo), подвергнутой упрочняющей термоциклической обработке. Выполнена оптимизация температурно-временных параметров её процесса по ударной вязкости, прочности при изгибе и твердости термоциклически обработанной стали Р6М5. На основе математических моделей построены диаграммы «параметры упрочняющей термоциклической обработки процесса – свойства». Обработка по оптимальному режиму позволяет увеличить износостойкость инструмента из стали Р6М5 в 1,5...3,0 раза по сравнению с традиционно термообработанным.

Введение. Термообработка является наиболее распространенным и дешевым методом объемного упрочнения инструмента. Среди различных способов термообработки (ТО) следует выделить способ «упрочняющей термоциклической обработки» (УТЦО), который повышает конструктивную прочность инструмента и изделий за счет «постоянного накопления от цикла к циклу положительных изменений в структуре металлов» [1 – 5]. Такой процесс УТЦО является завершающим этапом формирования структуры сталей и обеспечивает инструменту полученные в конечном итоге рабочие свойства. Если традиционная термообработка выполняется по одному варианту путем закалки и отпуска, то технология УТЦО для упрочнения режущего и штампового инструмента имеет более 20 вариантов, которые отличаются от стандартной термообработки термоциклическим режимом и различной последовательностью выполнения операций закалки и отпуска. При этом УТЦО инструментальных сталей может проходить с фазовыми или без фазовых превращений, с полными или неполными фазовыми превращениями при нагреве и охлаждении, с различными типами фазовых превращений: бездиффузионным (аустенита в мартенсит), диффузионным (аустенита в перлит) или комбинации этих типов.

В отличие от традиционной термообработки, 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 – 5]. Фазовый наклеп сопровождается процессами рекристаллизации, которые от цикла к циклу повторяются, что приводит к 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 – 5]. В целом в результате УТЦО достигается 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 (при изгибе и растяжении), твердость, теплостойкость, контактную выносливость, изотропность свойств и износостойкость сталей, уменьшает деформацию и опасность закалочных микротрещин по сравнению с традиционной термообработкой [1 – 8].

Процесс УТЦО, исходя из приведенного анализа, имеет большие перспективы для своего развития, прежде всего для инструмента, имеющего малый ресурс работы, и для инструмента многоцелевого назначения. Особое внимание в этом аспекте следует уделить быстрорежущим сталям (Р6М5, Р9, Р12, Р18, Р6М5К5, Р9М4К8, Р12МЗК8Ф2 и др.), которые благодаря комплексу механических и режущих свойств широко используются для изготовления различного режущего (иногда и штампового) инструмента. Среди указанных марок сталей наибольшее распространение получила сталь Р6М5, из-за ее невысокой стоимости. На практике остро стоит вопрос повышения стойкости длинномерного, мелкогабаритного

ного и тонкого инструмента, изготовленного из этой стали, а также инструмента, испытывающего ударные нагрузки (фрез, пробивных пуансонов и др.), поскольку традиционная термообработка не может обеспечить инструменту оптимальное сочетание и высокие показатели взаимно противоположных свойств: вязкости, с одной стороны, и прочности, теплостойкости, твердости – с другой. Такой традиционно закаленный режущий и штамповый инструмент обычно имеет малый ресурс работы: повышая твердость и прочность быстрорежущей стали, ее вязкость снижается настолько, что инструмент быстро ломается, а при значительном увеличении ударной вязкости, твердость и прочность стали уменьшаются, что ведет к смятию режущей кромки инструмента. Решить указанную проблему можно, применив УТЦО, которая позволит одновременно повысить взаимно противоположные механические свойства указанной быстрорежущей стали. Однако вопросы, связанные с термоциклической термообработкой практически всех быстрорежущих сталей, мало изучены.

Неоценимую помощь исследователю при трудоемком выборе оптимального варианта проведения процесса УТЦО быстрорежущей стали могут оказать математические методы планирования экспериментов, которые позволяют получать максимум информации при минимуме затрат. В материаловедении традиционно решают прямые задачи, когда на основании минимального количества экспериментов, проведенных по заранее заданным температурно-временным режимам (согласно плану экспериментов) определяют свойства материала, затем создают математические модели, описывающие влияние факторов и их взаимодействий, и с помощью графической интерпретации выбирают оптимальные параметры процесса [9]. Но этот подход не может решить всего комплекса вопросов, возникающих при проектировании технологии, поскольку функционирование любой технологической системы (таковой в данном случае является технология УТЦО быстрорежущей стали Р6М5) 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 [10 – 13].

Цель данной работы – оптимизация и компьютерное проектирование технологии УТЦО быстрорежущей стали Р6М5 с применением многомерного проектного синтеза технических объектов, материалов и технологий.

Объекты и методика исследований. Изучен технологический процесс УТЦО быстрорежущей стали Р6М5, который согласно опубликованным данным [1 – 8] является наиболее эффективным. Выбранный процесс УТЦО, в отличие от традиционной термообработки (рис. 1, а), включает многократный нагрев и охлаждение стали выше и ниже критической точки A_1 с окончательным закалочным охлаждением на последнем цикле и последующим традиционным трехкратным отпуском (рис. 1, б).

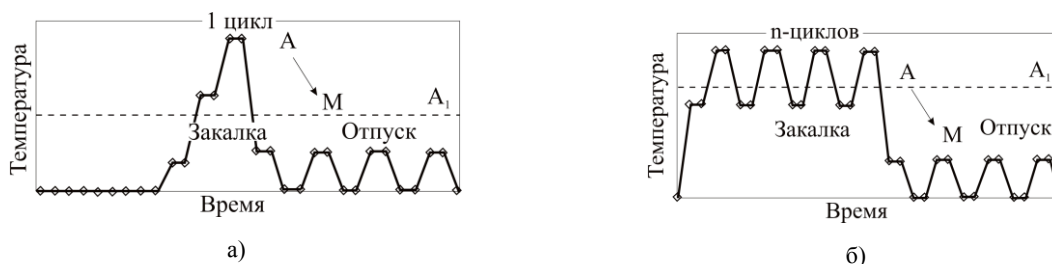


Рис. 1. Диаграммы традиционной термической обработки (а) и УТЦО (б) быстрорежущей стали

Процесс УТЦО изучали на быстрорежущей стали Р6М5 (6 % W, 5 % Mo) российского производства. При исследовании 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 термоцикла при УТЦО быстрорежущей стали Р6М5 соответствовала температуре ее нагрева под закалку

(1220 °С), а минимальную температуру термоцикла варьировали, не понижая ее ниже 750 °С. Процесс термоциклирования стали Р6М5 осуществляли в двух печах-ваннах следующим образом: сначала образцы подогрели при температуре 800 °С в течение 30 минут, затем загружали в ванну с максимальной температурой, выдерживали в ней необходимое время 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, выдерживали там 1 минуту и охлаждали на воздухе. Затем образцы (3 раза) отпускали при температуре 560 °С в течение 1 часа. 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_2 + 50 % NaNO_2 . Все процессы УТЦО были выполнены на стандартном термическом оборудовании.

Сравнительные испытания механических свойств быстрорежущей стали Р6М5 после УТЦО и стандартной термообработки проводили на специальных образцах: для определения ударной вязкости использовали образцы размером 10×10×55 мм без надреза; для определения прочности на изгиб применяли образцы размером 5×10×55 мм; определение твердости по Роквеллу осуществляли на поверхности ранее упомянутых образцов.

При проектировании процесса УТЦО стали Р6М5 и оптимизации его температурно-временных параметров по указанным выше свойствам применяли синтез-технологии метода многомерного проектного синтеза технологических объектов, материалов и технологий в виде базовой компьютерной программы СИНТЕЗ МК [10]. 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 Р6М5 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. Практически 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 [9] имеет более широкие возможности и позволяет:

- выбирать технически оптимальный вариант, обладающий наибольшей устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов производства;
- одновременно решать две 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;
- оперировать одновременно с несколькими свойствами материала при выборе оптимальных параметров процесса;
- выбирать в пространстве технологических параметров область устойчивого состояния системы, в которой одновременно достигаются и стабильно воспроизводятся заданные свойства материала.

Результаты исследований. На основании предварительных исследований технологии УТЦО установлено, что наилучшие результаты по свойствам показывает быстрорежущая сталь Р6М5, подвергнутая термоциклированию вокруг точки A_1 (см. рис. 1) с неполной выдержкой при температурах термоциклического нагрева и охлаждения [7, 8]. Сталь Р6М5 имеет лучшие показатели твердости, прочности и ударной вязкости при 3...5 термоциклах УТЦО (рис. 2).



Рис. 2. Влияние количества циклов при УТЦО на свойства быстрорежущей стали Р6М5.

УТЦО: ТЦО 1220 °С ↔ 750 °С с последующей закалкой + отпуск 560 °С, 1 ч, 3 раза

Для сравнения, после традиционной термообработки быстрорежущей стали Р6М5 ее ударная вязкость составила 4,9 МДж/м², прочность при изгибе – 3159 МПа, а твердость – HRC 64. Изменения микроструктуры стали Р6М5 с увеличением числа термоциклов видны на рисунке 3.

Следующий этап исследований – выбор технически оптимального варианта процесса УТЦО. Для этого проводили термоциклическую обработку быстрорежущей стали Р6М5 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 Р6М5, полученные при реализации 10 опытов плана экспериментов [9], представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты исследования твердости, ударной вязкости и прочности быстрорежущей стали Р6М5, подвергнутой УТЦО

Параметры процесса	Факторы			Отклики		
	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 $\sigma_{\text{из}}$, 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			
Номер опыта						
1	+	+	+	63	5,1	3650
2	-	+	+	63	5,4	3646
3	+	-	+	63,5	5,5	3833
4	-	-	+	63,5	3,1	3046
5	+	+	-	64	6,5	3660
6	-	+	-	65	6,8	4231
7	+	-	-	64	5,3	3674
8	-	-	-	64,5	7,3	3830
9	0	0	0	63,5	4,8	3261
10	0	0	0	63,5	4,6	3278
11	0	0	0	63	3,4	3534

На основании экспериментальных данных рассчитаны линейные и нелинейные математические модели, описывающие влияние температурно-временных параметров на свойства термоциклированной стали Р6М5. Однако линейные модели оказались неадекватными. Адекватными признаны только нелинейные многокритериальные математические модели следующего вида:

$$Y_1 = 70,20 - 0,01X_1 - 0,02X_2 - 0,01X_3 + 0,01 X_1^2 + 0,01 X_2^2 - 0,01 X_3^2;$$

$$Y_2 = 115,66 - 0,06X_1 - 0,02X_2 - 0,31X_3 + 0,01 X_1^2 + 0,01 X_2^2 + 0,01 X_3^2;$$

$$Y_3 = 41726,39 - 9,04X_1 - 15,63X_2 - 15,64X_3 + 0,08 X_1^2 + 0,06 X_2^2 + 0,02 X_3^2,$$

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 – время выдержки при минимальной температуре термоцикла; X_3 – минимальная температура термоцикла.

Из-за многокритериальности, стохастичности и нелинейности технологической системы «процесс УТЦО быстрорежущей стали Р6М5» 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 системы решения технологических задач проектирования 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 Р6М5 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 Р6М5 с помощью базовой программы СИНТЕЗ МК осуществляли в несколько этапов. Результаты компьютерного выбора технически оптимального варианта изучаемой технологической системы – (процесса УТЦО стали Р6М5) сведены в таблицы 2, 3. При решении обратной многокритериальной задачи необходимо задать желаемые уровни показателей свойств термоциклически упрочненной стали Р6М5 (табл. 4).

Таблица 2

Оптимальные параметры процесса УТЦО стали Р6М5 и поля их рассеивания

Наименование параметра процесса	Номинальное значение	Разрешенные поля рассеивания
Минимальная температура, °С	749	24
Время выдержки при максимальной температуре, с	99	35
Время выдержки при минимальной температуре, с	190	50

Таблица 3

Оптимальные показатели свойств стали Р6М5 после УТЦО и поля их рассеивания

Наименование оптимального показателя свойств	Номинальное значение	Поля рассеивания
Ударная вязкость, КС, МДж/м ²	5,3	2,9
Прочность при изгибе, $\sigma_{\text{из}}$, МПа	4723	1345
Твердость HRC	64,8	0,7

Таблица 4

Заданные границы свойств стали Р6М5 после УТЦО

Наименование желаемого показателя свойств	Минимальное значение	Максимальное значение
Ударная вязкость, КС, МДж/м ²	4,0	7,0
Прочность при изгибе, $\sigma_{\text{из}}$, МПа	4000	6000
Твердость HRC	64,5	66

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

Таблица 5

Определение запаса работоспособности системы по входным параметрам

Наименование параметра процесса	Значение параметра	Значение производственного допуска	Поле производственного допуска	Коэффициент работоспособности
Минимальная температура, °С	749	±5	10	2,4
Время выдержки при максимальной температуре, с	99	±5	10	3,5
Время выдержки при минимальной температуре, с	190	±5	10	5,0

Для визуальной интерпретации результатов, полученных при решении задач исследования и проектирования технологии УТЦО быстрорежущей стали Р6М5, построены дискретные портреты, отображающие возможные состояния изучаемой технологической системы (рис. 3). Выделение областей устойчивости в многомерном пространстве состояний является важной частью оценки качества технологической системы и выбора технически оптимального варианта системы. На рисунке 3 показано виртуальное пространство состояний технологической системы. В качестве критериев выступают одновременно несколько свойств стали Р6М5: ударная вязкость с желаемым уровнем 4...6 МДж/м², прочность на изгиб с желаемым уровнем 4000...5500 МПа; твердость HRC не ниже 64,5 (см. табл. 4).

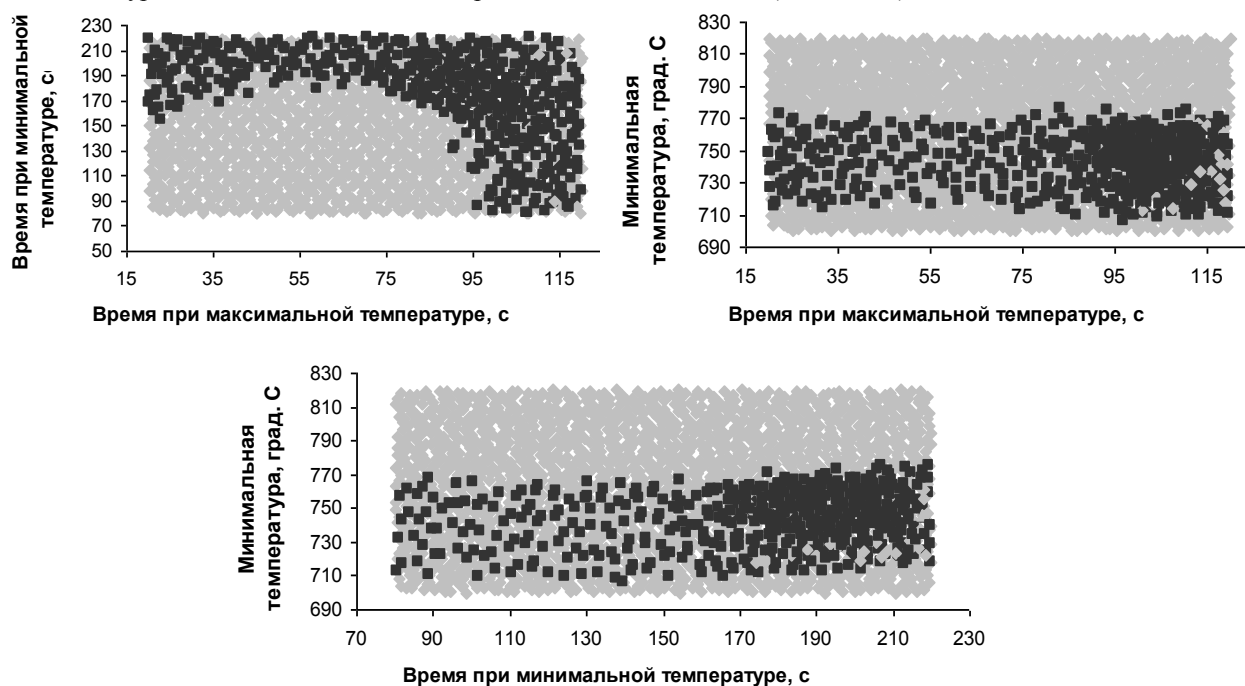


Рис. 3. Дискретные портреты виртуального пространства технологической системы процесса УТЦО стали Р6М5

- ◆ – вариант системы, обеспечивающий заданные свойства стали Р6М5;
- ◇ – вариант системы, не обеспечивающий заданные свойства стали Р6М5

Из рисунка 3 видно, что технология УТЦО стали Р6М5 реализуется с высокими свойствами только тогда, когда система попадает в области устойчивости (отмеченные темными точками). Выход одного или нескольких температурно-временных параметров за пределы областей 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 Р6М5» были установлены фактические показатели свойств термодинамически обработанной стали Р6М5 (табл. 6), стопроцентный уровень воспроизводимости которых достигается при точном соблюдении параметров процесса УТЦО в пределах производственных допусков (см. табл. 5).

Таблица 6

Фактические показатели свойств стали Р6М5 после УТЦО и границы их рассеивания по результатам виртуальных испытаний технологической системы

Наименование показателя свойств	Номинальное значение	Границы рассеивания показателей свойств	
		Нижняя	Верхняя
Ударная вязкость КС, МДж/м ²	5,3	4,9	5,7
Прочность при изгибе, $\sigma_{из}$, МПа	4723	4099	5444
Твердость HRC	64,8	64,5	65,2

Применение результатов исследований. Результаты промышленных испытаний свидетельствуют о том, что упрочняющая термоциклическая обработка режущего инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали Р6М5, позволяет увеличить его износостойкость в 1,5...3,4 раза по сравнению с традиционно термообработанным (табл. 7).

Таблица 7

Результаты испытаний режущего инструмента из стали Р6М5 после УТЦО

Вид инструмента	Повышение износостойкости инструмента, K_W
Фрезы	1,6...2,1
Резцы	1,5...1,9
Сверла	1,8...2,8
Развертки, зенкера	1,5...3,0
Метчики	1,7...2,7
Пробивные пуансоны	1,5...2,3

Многочисленные лабораторные и производственные испытания режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 показали, что технология УТЦО наиболее эффективна для тонкого, мелкоразмерного и длинномерного инструмента, для инструмента, испытывающего ударные нагрузки (фрез, пробивных пуансонов и др.), и для резания нержавеющей, жаропрочных и цветных сплавов. Процесс УТЦО быстрорежущих сталей успешно использован на предприятиях Беларуси и России.

Заклучение. В результате проведенного исследования выполнено математическое моделирование и компьютерное проектирование процесса УТЦО быстрорежущей стали Р6М5 с помощью компьютерных синтез-технологий метода многомерного проектного синтеза технических объектов, материалов и технологий.

Определены технически-оптимальные режимы для реализации процесса в производстве с гарантированным достижением заданных свойств стальных изделий, подвергнутых УТЦО. Процесс упрочняющей термоциклической обработки быстрорежущей стали Р6М5 повышает одновременно два противоположных свойства: прочность и вязкость, что позволяет по сравнению с традиционной термообработкой, увеличить износостойкость режущего инструмента не менее 1,5 раз.

Разработан простой и экономичный способ термоциклической обработки быстрорежущих сталей, который предназначен для улучшения эксплуатационных свойств тонкого, мелкоразмерного инструмента и инструмента, испытывающего ударные нагрузки и резания труднообрабатываемых сплавов. Технология УТЦО может заменить существующие технологии термообработки данного инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федюкин, В.К. Научное обоснование и разработка технологий улучшающей термоциклической обработки металлических материалов: дис. ... д-ра техн. наук / В.К. Федюкин. – СПб., 1993. – 323 с.
2. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка сталей и чугунов / В.К. Федюкин. – Л.: ЛГУ, 1977. – 143 с.
3. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов / под общ. ред. М.Х. Шоршорова. – М.: Наука, 1984. – 186 с.
4. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.
5. Федюкин, В.К. Метод термоциклической обработки металлов / В.К. Федюкин. – Л.: ЛГУ, 1984. – 192 с.

6. Гурьев, А.М. Экономно-легированные стали для литых штампов горячего деформирования и их термоциклическая и химико-термическая обработка: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01 / А.М. Гурьев; Ин-т физ. прочн. и материаловед. СО РАН. – Томск, 2001. – 43 с.
7. Способ термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали: пат. 2010870 РФ, МПК5 С21D 9/22 / А.А. Шматов, Л.Г. Ворошнин; заявитель Шматов А.А. – № 4790444; заявл. 21.02.90; опубл.15.04.94 // Открытия. Изобретения. – 1994. – № 7.
8. Способ термической обработки режущего инструмента из быстрорежущей стали: а.с. 1837079 СССР, МКИ5 С21D 9/22 / А.А. Шматов, Л.Г. Ворошнин, А.В. Щебров; – № 4725981; заявл. 21.08.89; опубл. 13.10.92 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 45.
9. Новик, Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Раздел IV / Ф.С. Новик. – М.: МиСИС, 1971. – 148 с.
10. Витязь, П.А. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования / П.А. Витязь, О.В. Жилинский, Т.В. Лактюшина // Физическая мезомеханика. – Томск, 2004. – Т. 7. – С. 3 – 11.
11. Математическое моделирование, компьютерное проектирование и исследование технологии получения легкоплавких подшипниковых сплавов, модифицированных ультрадисперсной алмазографитовой шихтой / П.А. Витязь [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2005. – № 6. – С. 2 – 6.
12. Компьютерные синтез-технологии исследования и проектирования технических и технологических систем / П.А. Витязь [и др.] // Информационные технологии в промышленности (ИТ*2008): пятая междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22 – 24 окт. 2008 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси. 2008. – С. 11 – 12.
13. Выбор технически оптимального варианта методами компьютерных синтез-технологий исследования и проектирования технических и технологических систем / П.А. Витязь [и др.] // Информационные технологии в промышленности (ИТ*2008): пятая междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22 – 24 окт. 2008 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси. 2008. – С. 29 – 30.

Поступила 18.02.2009