

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ БЫТОВЫХ МАШИН

Д.А. Иванов¹, О.Н. Засухин²

¹Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики (СПбГУСЭ),
191015, Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 7, лит. А;

²Балтийский государственный технический университет (БГТУ) «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, 190005 Санкт-Петербург ул. 1-я Красноармейская, д. 1.

Рассматривается использование газоимпульсной обработки в процессе термического упрочнения стальных деталей бытовых машин.

Ключевые слова: конструкционные стали, газоимпульсная обработка, конструктивная прочность.

USE OF GAS-PULSE WORKING IN THE PROCESS OF THERMAL STRENGTHENING OF THE PARTS OF THE EVERYDAY MACHINES

*St.-Petersburg state university of service and economy (SPbSUSE),
191015, St.-Petersburg, street Kavalergardsky, 7 A;*

*The VOYENMEKH Baltic State Technical University (BSTU) of D.F. Ustinov, 190005 St. Petersburg 1st
Krasnoarmeyskaya St., 1.*

The use of gas-pulse working in the process of thermal strengthening of the steel parts of everyday machines is examined.

Key words: structural steels, gas-pulse working, structural strength.

Детали из конструкционных легированных сталей, упрочняемых термической обработкой широко применяются в бытовых машинах. Для успешного решения задач сервиса бытовых машин необходимо иметь представление о современных тенденциях в практике упрочняющей термической обработки подобных материалов.

Повышение конструктивной прочности легированных конструкционных сталей традиционных марок в сравнении со стандартными способами термической требует сочетания термообработки с дополнительными воздействиями, такими, как электромагнитное, акустическое, в том числе ультразвуковое и другими. Обыкновенно подобное дополнительное воздействие совмещают с процессом закалки, охлаждение же после отпуска исследуется, как правило, лишь в связи с наличием обратимой отпускной хрупкости. Вместе с тем, воздействие на стальные изделия в процессе отпускного охлаждения требует внесения меньших дорогостоящих технологических изменений, чем внедрение комбинированных методов закалки. Поэтому представляет практический интерес исследование воздействия на стали в процессе отпускного охлаждения дозвуковыми воздушными потоками, создание которых осуществимо по

сравнению со сверхзвуковыми на менее сложном и дорогостоящем оборудовании [1].

В ходе исследования закалённое и нагретое до отпускной температуры изделие после требуемой выдержки помещалось в рабочую камеру экспериментальной установки, генерирующей воздушный поток с частотой колебаний 400-1200 Гц, импульсным воздушным давлением порядка 10 кПа и переменным звуковым давлением до 100 дБ, оказывающий на остывающее изделие комплексное воздействие. При изучении влияния пульсирующего воздушного потока на стальные изделия в процессе их охлаждения после отпуска исходили из предположения, что импульсное воздействие повышает подвижность дислокаций, а следовательно и пластичность, а также способствует релаксации остаточных напряжений, присутствующих в изделии после закалки и полностью не устраняемых традиционным отпуском.

Влияние пульсирующих воздушных потоков на механические свойства сталей оценивалось путём испытания стандартных разрывных и ударных образцов из сталей 40Х; 40ХС, закалённых в масле и отпущенных с воздействием и без воздействия газовых импульсов в процессе отпускного охлаждения. Результаты испытаний показали, что воздей-

ствие газовыми импульсами, оказываемое в процессе охлаждения после отпуска при температуре 200° С позволяет несколько повысить прочность, что может быть связано с интенсификацией пульсациями процесса релаксации остаточных напряжений, сглаживания пиков напряжений путём эстафетной передачи деформации в ненапряжённые микрообъёмы. Данные, полученные с помощью специальных образцов – колец Френча показывают, что при прочих равных условиях тангенциальные остаточные закалочные напряжения после отпускного охлаждения от температуры 200° С с импульсным воздействием в среднем на 35% меньше, чем статочные напряжения в образцах, не подвергавшихся импульсной обработке. Вместе с тем очевидно, что при температуре нагрева 200° С последующее кратковременное импульсное воздействие не может в достаточной степени обеспечить повышение подвижности дислокаций. При более высоких отпускных температурах (450-600° С) импульсное воздействие в процессе отпускного охлаждения способно оказать более значительное влияние на подвижность дислокаций, способствуя повышению пластичности и ударной вязкости.

Результаты исследований, представленные в виде гистограммы (Рис. 1) показывают, что для закалённой в масле стали 40X после отпуска в течение 30 минут и последующего импульсного воздействия в процессе отпускного охлаждения достигается уровень пластичности и ударной вязкости, соответствующий выдержке в течение 60 минут при обычном отпуске, значения же показателей прочности после импульсного воздействия остаются на уровне, соответствующем тридцатиминутной отпускной выдержке без последующей обработки газовыми импульсами. Подобные результаты получены и для стали 40XC.

При термической обработке на высокопрочное состояние сталей 40X и 40XC применялся комбинированный отпуск, в ходе которого с целью повышения эффективности воздействия газовых импульсов производился кратковременный нагрев до более высоких температур, чем основная температура отпуска.

Исследования выявили, что импульсное воздействие, оказываемое в процессе охлаждения после отпуска при температуре 200 °С, позволяет несколько повысить прочность, что может быть связано с интенсификацией пульсациями процесса релаксации остаточных напряжений, сглаживания пиков

напряжений путём эстафетной передачи деформации в ненапряжённые микрообъёмы. Пластичность в результате импульсного воздействия при данной температуре возрастает незначительно (Табл. 1). Очевидно, что при температуре нагрева 200 °С последующее непродолжительное импульсное воздействие не может в достаточной степени обеспечить повышение подвижности дислокаций. Наиболее высокие сравнительные механические свойства получены в результате испытания образцов, подвергнутых обработке с использованием комбинированного нагрева: после выдержки при основной температуре отпуска они подвергались перед помещением в установку кратковременному нагреву до более высокой температуры с целью повышения эффективности импульсного воздействия. Полученные в результате испытаний средние значения, приведённые в табл. 2, показывают, что импульсная обработка приводит к повышению пластичности и ударной вязкости, а также к некоторому увеличению прочности. При той же или несколько большей прочности рост относительного удлинения составил от 4,5 до 13,6 %; ударной вязкости – от 30 до 50%.

В результате испытаний образцов из стали 40X, подвергнутой импульсной обработке в процессе отпускного охлаждения получено существенное превышение значениями показателей пластичности и ударной вязкости значений аналогичных показателей после термообработки без импульсного воздействия. Рост относительного удлинения составил от 4,5 до 13,6%, ударной вязкости – от 30 до 50%. Подобная обработка стали 40XC позволила, как и в случае стали 40X, при прочих равных условиях повысить пластичность и ударную вязкость в высокопрочном состоянии.

Таким образом, воздействие дозвуковых пульсирующих газовых потоков при обработке на высокопрочное состояние сталей 40X; 40XC, осуществляемое в процессе охлаждения после отпуска обеспечивает в сравнении с термообработкой без импульсного воздействия увеличение ударной вязкости до 1,5 раз, рост относительного удлинения и сужения при таких же или несколько более высоких показателях прочности, что повышает надёжность изделий и позволяет снизить их металлоёмкость.

При проведении термоулучшения, воздействие газовых импульсов в процессе охлаждения после высокого отпуска сталей 40X; 40XC обеспечивает повышение пластич-

ности и ударной вязкости с сохранением или некоторым ростом прочности при равном времени отпускной выдержки со сталями тех же марок, отпущенными без импульсной обработки.

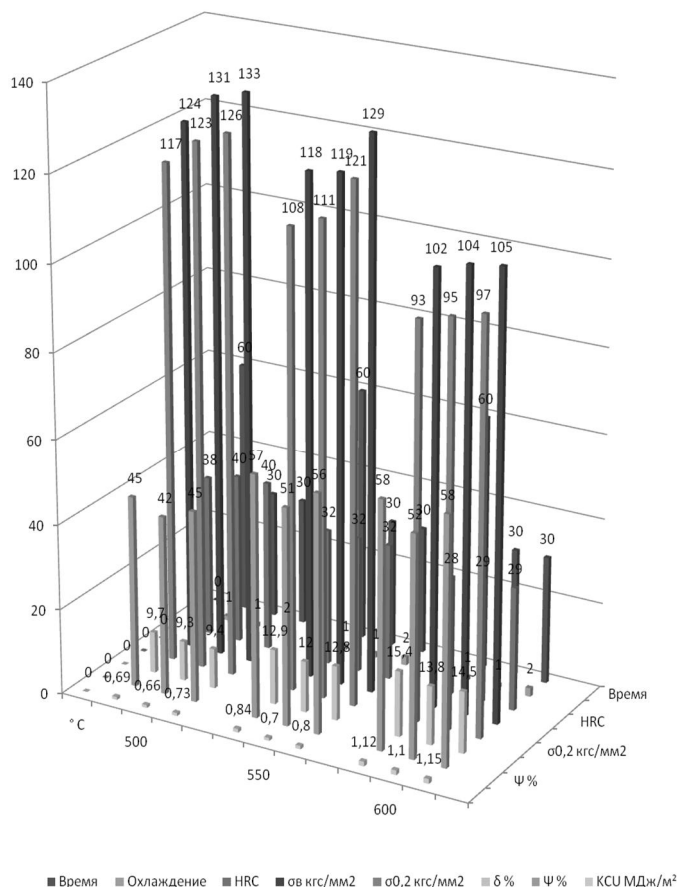


Рисунок 1. Механические свойства стали 40X после закалки в масле с 860° С и последующего отпуска при температурах 500, 550 и 600° С: 1 – охлаждение на воздухе, 2 – охлаждение пульсирующим воздушным потоком.

В случае высокого отпуска по интенсивным режимам, в два и более раза менее продолжительным по сравнению со стандартными, импульсное воздействие обеспечивает повышение прочности при сохранении пластичности и ударной вязкости соответствующими значениями, полученным после обычного отпуска по стандартным режимам, что наряду с возможным снижением металлоёмкости изделий уменьшает энергозатраты в ходе термообработки и продолжительность технологических процессов.

В ходе исследований были установлены режимы отпуска, в том числе комбинированного, при которых воздействие пульсирующего газового потока оказывает наибольшее влияние на структуру и свойства сталей. Так,

при обработке на высокопрочное состояние, пятидесятипроцентное повышение ударной вязкости в сравнении с отпуском без импульсного воздействия для закалённой в масле стали 40X обеспечили нагрев до температуры 200° С, выдержка в течение 1 часа и дополнительный кратковременный (7 минут) нагрев до температуры 300° С с последующей обработкой пульсирующим воздушным потоком в процессе охлаждения.

В случае проведения термоулучшения наиболее высокие сравнительные механические свойства сталь 40X приобретает после отпуска при температуре 550° С и импульсной обработки в ходе охлаждения с отпускной температуры.

Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности и практической значимости использования нестационарных газовых потоков в качестве средства повышения механических и эксплуатационных свойств стандартно закалённых сталей.

В качестве высокопрочных (предел прочности более 1600 МПа) часто используются легированные конструкционные улучшаемые стали, в том числе 38ХС и 40Х. Термообработка на высокопрочное состояние заключается в закалке на мартенсит с последующим низким отпуском продолжительностью 1,5-2 часа. Столь продолжительный отпуск требуется для полного осуществления процесса релаксации остаточных напряжений. Актуальной является задача уменьшения продолжительности отпуска без снижения конструктивной прочности.

В ходе исследований решалась задача поставлена задача сокращения продолжительности технологического процесса упрочняющей термической обработки конструкционных сталей при сохранении высоких значений показателей твёрдости и прочности и обеспечении достаточной надёжности. Решение поставленной задачи достигается тем, что конструкционные стали подвергают стандартной для сталей данных марок закалке на мартенсит с последующим воздействием на них пульсирующего дозвукового воздушного потока, имеющего частоту 1130-2100 Гц и звуковое давление 120-140 дБ при комнатной температуре (газоимпульсной обработке).

Исследования осуществлялись при помощи газоструйного генератора (рис. 2) типа свистка Гавро с цилиндрическим резонатором, на дне которого для подачи сжатого воздуха соосно с резонатором закреплен газоход. Противоположный торец газохода с помощью плоской круглой крышки образует

щелевое кольцевое сопло, ширина которого регулируется сменными втулками. Накидная гайка фиксирует положение сменного кольцевого ножа, имеющего клиновой профиль с острием направленным в сторону щелевого сопла. Такое устройство генератора позволяло варьировать удаление клинового ножа от среза сопла, ширину щели сопла и взаимное положение ножа относительно кромок сопла. Веерная струя, натекая на кольцевой нож, создает условия для возбуждения режимов нестационарного наполнения и опорожнения резонатора, что, в свою очередь, вызывает колебательное движение веерной струи. Установка соответствующих цилиндрических проставок одинаковой длины на газоход и резонатор позволяла регулировать глубину резонатора.

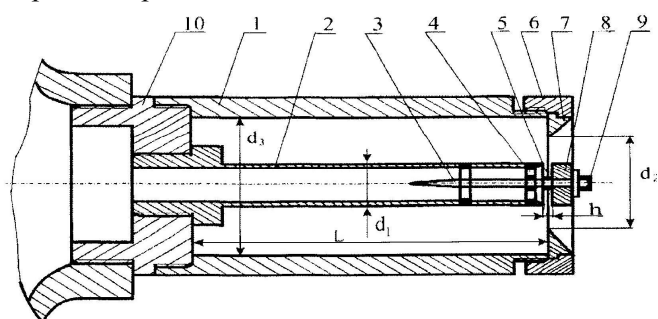


Рисунок 2. Газоструйный генератор:

1 – цилиндрический резонатор, 2 – газоход, 3 – центральное тело, 4 – диск, 5 – сменная втулка, 6 – накидная гайка, 7 – сменный кольцевой нож, 8 – крышка, 9 – гайка, 10 – переходник

На параметры акустического поля влияли режимы истечения сжатого воздуха и геометрические соотношения размеров деталей установки: давление торможения рабочего газа P_0 , глубина полости резонатора L , расстояние среза сопла от кромки кольцевого ножа b , ширина щели сопла h . Продувки проводились при изменениях ширины щели сопла от 0,4 мм до 2,1 мм, глубины резонатора от 169 мм до 400 мм, расстояния от среза сопла до кромки ножа от 6,5 мм до 17,5 мм. Расстояние от среза сопла до острой кромки ножа изменялось дискретно путем установки кольцевых ножей 5 с различными центральными отверстиями от 40 до 75 мм. Внутренний диаметр резонатора 1 равнялся $d_3 = 85$ мм. Наружный диаметр газохода 2 был равен $d_2 = 30$ мм и соответствовал диаметру крышки 8, образующей вместе торцем газохода, кольцевое сопло.

Интегральный уровень шума L Дб, излучаемого генератором, изменяется с ростом полного давления в ресивере немонотонно.

Более высокие величины излучения были получены при значении диаметра центрального отверстия d_2 в кольцевом ноже, приближающемся к диаметру внутренней полости резонатора. Количество дискретных частот в спектре, заметно превышающих уровень белого шума, колебалось от 5- 6 до 1-2 в зависимости от величины полного давления в газоход перед соплом и сочетания конструктивных параметров экспериментальной установки на конкретном режиме. При чем с уменьшением количества частот до наличия единственной частоты в спектре значение ее интенсивности излучения приближается к величине интегрального шума излучателя на данном режиме.

Механизм автоколебаний очень похож на колебания струи в обычном свистке Гавро, имеющиеся отличия в параметрах излучаемого шума определяются особенностями конструктивного исполнения излучателя и условиями формирования и взаимодействия веерной струи с острой кромкой кольцевого ножа.

Технологически данная обработка конструкционных сталей на высокопрочное состояние реализуется следующим образом: Стальное изделие закаливается на мартенсит стандартно для стали данной марки, после чего при комнатной температуре размещается на выходе из резонатора установки и подвергается в течение 10-15 минут воздействию пульсирующего дозвукового воздушного потока, имеющего частоту 1130-2100 Гц и звуковое давление 120-140 дБ, оказывающего комплексное влияние на метастабильную структуру мартенсита и способствующее протеканию в ней процессов, аналогичных превращениям при низком отпуске, вызывая при этом более значительное, чем при низком отпуске снижение остаточных напряжений. При этом выбор амплитудно-частотных характеристик воздушного потока и продолжительности обработки определяется геометрическими параметрами, а также материалом обрабатываемого изделия [2]. Механические свойства сталей 40Х и 38ХС после описанной обработки более высокие в сравнении со свойствами после стандартной обработки на высокопрочное состояние, заключающейся в закалке и последующем низком отпуске. При твердости в среднем на 2 единицы HRC выше и более высоких значениях показателей прочности значения показателей пластичности и ударной вязкости не уступают стандартным. Подобно тому, как в случае механического воздействия на остаточный аустенит в закаленной стали он превращается в мартенсит,

метастабильный мартенсит закалки может распасться с образованием мартенсита отпуска и ϵ -карбида в результате распространения в изделии механических волн. Также происходит релаксация остаточных закалочных напряжений вследствие перемещения дислокаций.

Данный способ позволяет применять обработку пульсирующим воздушным потоком к изделиям из конструкционных легиро-

ванных сталей, термообрабатываемых на высокопрочное состояние.

Таким образом был получен технический результат, заключающийся в сокращении в 3-4 раза продолжительности технологического процесса упрочняющей термической обработки конструкционных сталей при сохранении высоких значений показателей твёрдости и прочности и обеспечении достаточной надёжности.

Таблица 1. Механические свойства стали 40X, закалённой в масле с 860 °С на твёрдость 52 HRC при стандартном отпуске и отпуске с импульсной обработкой.

Режим отпуски	№ опыта	Механические свойства				
		HRC	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
			МПа		%	
200 °С 120 мин. Воздух	1	50	1860	1650	3	7
	2	50	1680	1380	4	8
	3	50	1800	1600	4	8
	Среднее значение	50	1780	1543	3,7	7,7
200 °С 120 мин. Воздух с импульсной обработкой	1	50	1860	1650	3,7	9
	2	50	1760	1640	5,3	8
	3	50	1820	1630	5	8
	Среднее значение	50	1813	1643	4,7	8,3

Таблица 2. Механические свойства стали 40X, закалённой в масле с 860 °С после комбинированного отпуска.

Режим отпуска	Механические свойства					
	HRC	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU
		МПа		%		МДж/м ²
Нагрев до 200 °С, 1 час + нагрев до 300 °С, 7 мин. охлаждение на воздухе	51	1810	1510	8,9	38	0,2
То же с импульсной обработкой	51	1815	1510	9,6	43	0,3
Нагрев до 200 °С, 1,5 часа + нагрев до 350 °С, 7 мин. охлаждение на воздухе	49	1680	1480	8,1	40	0,3
То же с импульсной обработкой	49	1765	1520	9,2	50	0,4
Нагрев до 200 °С, 1,5 часа + нагрев до 400 °С, 7 мин. охлаждение на воздухе	48	1600	1470	8,4	33	0,2
То же с импульсной обработкой	48	1655	1485	9,3	40	0,3

Литература

1. Иванов Д.А., Васильева А.В. Струйные технологии в машиностроении. Монография. – СПб.: Изд-во СПбГУЭСЭ, 2010. – 147 с.

2. Иванов Д.А. Засухин О.Н. Газоимпульсная обработка машиностроительных материалов без предварительного нагрева // Двигателестроение. – СПб., 2010, №2, с. 20-22.

¹ *Иванов Денис Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика», СПбГУЭСЭ, тел.: (812) 368-40-64, моб.: +7 9817640822, e-mail: tm_06@mail.ru;*

² *Засухин Отто Николаевич – заведующий лабораторией газодинамики БГТУ им Устинова, моб.: +7 951 6484544 e-mail: komder@bstu.spb.su.*