

УДК 62-1/-9

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГАЗОВОГО ПОТОКА НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Иванов Д.А.

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, e-mail: tm_06@mail.ru*

Разработан метод повышения механических свойств металлических материалов в среде пульсирующего дозвукового газового потока. Экспериментально установлено, что воздействие пульсаций воздушного или водовоздушного потока позволяет снизить уровень остаточных напряжений в металлических изделиях и уменьшить их деформации.

Ключевые слова: пульсирующий газовый поток, термообработка, остаточные напряжения, конструкционные стали

INFLUENCE OF THE PULSATORY GAS FLOW ON THE STRESSED STATE OF THE HEAT-TREATED COMPONENTS

Ivanov D.A.

*Baltic state technical university «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg,
e-mail: tm_06@mail.ru*

A method for enhancing the mechanical properties of metallic materials in the pulsating environment of subsonic gas flow. It was established experimentally that the effect of the pulsations of the air or water-air stream to reduce the level of residual stresses in the metal products and to reduce their deformation.

Keywords: the pulsatory gas flow, heat treatment, residual stresses, structural steels

В процессе как изготовления, так и ремонта металлических деталей могут применяться такие связанные с термическим воздействием методы, как сварка, наплавка, восстановление покрытий газотермическим напылением а также различные виды упрочняющей термической обработки, включая закалку стальных деталей с последующим отпуском.

Следствием неравномерности и неоднородности объёмных изменений в изделиях при охлаждении в них возникают термические, а в случае протекания структурных превращений – и фазовые остаточные напряжения, оказывающие существенное влияние на надёжность, долговечность и коррозионную стойкость. Поэтому вопрос оптимизации остаточных напряжений в металлических термообработанных деталях представляет значительный практический интерес.

Одним из современных методов повышения механических свойств металлических материалов является использование в качестве закалочной среды пульсирующего дозвукового водовоздушного потока. Закалка осуществляется с помощью установки, позволяющей генерировать дозвуковые пульсирующие воздушные или водовоздушные потоки. Установка (рисунок) состоит из системы подачи воздуха, устройства

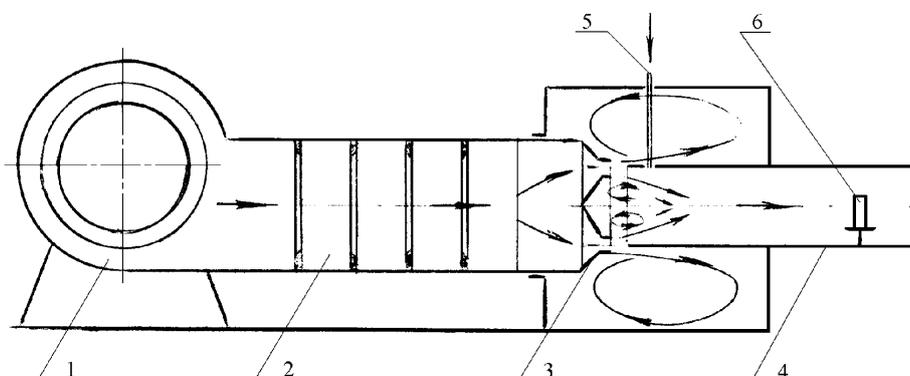
возбуждения пульсаций, рабочей камеры и магистрали подвода охлаждающей жидкости. В установке создается пульсирующий воздушный поток с частотой колебаний 400–1200 Гц, импульсным воздушным давлением около 10 КПа и переменным звуковым давлением до 100 дБ, оказывающий комплексное воздействие на помещённое в установку изделие. В воздушный поток может вводиться по магистрали охлаждающая жидкость, в качестве которой обычно используется вода.

Предварительно нагретое до температуры закалки изделие после требуемой выдержки в печи при заданной температуре помещается в рабочую камеру установки, куда подается пульсирующий воздушный или водовоздушный поток, прошедший через набор диафрагм, установленных в канале на пути движения воздуха, истекающий из кольцевого сопла и взаимодействующий с резонатором. Происходит охлаждение изделия с заданной скоростью за счет однофазного или двухфазного (воздушного или водовоздушного) пульсирующего потока.

Скорость охлаждения изделия регулируется увеличением или уменьшением расхода охлаждающей жидкости. Воздействие пульсаций закалочной среды в процессе охлаждения стали обеспечивает по сравнению с закалкой в традиционных средах

(вода, масло) более высокую дисперсность продуктов мартенситного превращения и продуктов распада мартенсита в ходе последующего отпуска. В результате закаленные с применением импульсного воз-

действия стальные изделия после окончательной термической обработки обладают повышенными механическими свойствами: прочностью, пластичностью, ударной вязкостью.



Установка для обдува термообрабатываемых изделий воздушным или водовоздушным пульсирующим потоком: 1 – воздуходувка ТВР-3; 2 – успокоительная камера; 3 – генератор пульсаций; 4 – рабочая камера; 5 – подвод воды; 6 – объект обдува

Совмещение с воздействием пульсирующего потока регулирования скорости охлаждения в процессе закалки позволяет управлять свойствами изделий, а также уровнем и знаком остаточных напряжений, которые способны оказывать значительное влияние на конструктивную прочность, как сочетание требуемого уровня значений показателей статической прочности, надежности и долговечности [1–10].

Было проведено исследование влияния дозвукового низкочастотного пульсирующего потока при закалочном охлаждении на уровень и знак остаточных напряжений в сталях.

Остаточные напряжения после закалки делятся на температурные и фазовые. Чтобы

исключить влияние последних, внутренние напряжения определялись на кольцевых образцах из стали аустенитного класса 12Х18Н9Т (С – 0,12%, Cr – 18%, Ni – 9%, Ti – 0,5%), в которой отсутствует мартенситное превращение в области положительных температур.

Уровень остаточных напряжений в зависимости от термической обработки оценивался с помощью колец Френча.

Кольцевые образцы подвергались нагреву до температуры 900 °С. Охлаждение образцов проводилось в воде и в пульсирующем дозвуковом водовоздушном потоке. Полученные значения величин остаточных напряжений приведены в таблице.

Значения остаточных напряжений в образцах из стали 12Х18Н9Т после закалки

Режим закалки	Свойства			
	Температура нагрева, °С	Среда охлаждения	HRB	$\sigma_{ост}$, МПа
900		вода	70–80	37
		пульсирующая водовоздушная смесь	70–80	–25

Как видно из приведённых в таблице результатов, обработка пульсирующим потоком оказывает влияние не только на величину, но и на знак остаточных напряжений, при этом сама величина напряжений уменьшается.

В дальнейшем было изучено влияние пульсирующего дозвукового водовоздушного потока на напряженно-деформированное состояние стали 40Х при термообработке.

Для стали 40Х, как и для многих других конструкционных сталей, распространён-

ным способом придания требуемых механических и эксплуатационных свойств является закалка с последующим отпуском. Среди других видов термической обработки закалку выделяет высокая скорость охлаждения после нагрева, обеспечивающего аустенитное состояние, необходимая в большинстве случаев для переохлаждения аустенита до температуры начала мартенситного превращения. Критическая скорость охлаждения может составлять сотни градусов в секунду. В результате при охлаждении термические временные напряжения, возникающие за счёт градиента температур по объёму изделия, могут превосходить значение предела текучести (при данной температуре), вызывать пластическую деформацию, и после выравнивания температурного поля в наружных слоях изделия будут иметь место сжимающие (отрицательные), а во внутренних слоях – растягивающие (положительные) остаточные термические напряжения.

К пластической деформации материала приводят фазовые структурные напряжения, возникающие в ходе мартенситного превращения, сопровождающегося увеличением объёма. Остаточные фазовые напряжения в наружных слоях – положительные, во внутренних – отрицательные, и таким образом, имеют знаки, противоположные знакам остаточных термических напряжений.

Фазовые напряжения алгебраически складываются с термическими и в зависимости от соотношения их величин могут образовываться различные эпюры распределения напряжений по сечению. Остаточные напряжения, возникающие в процессе закалки, полностью не устраняются даже после высокого отпуска, поэтому перед современными способами термообработки, включая комбинированные, стоит задача по осуществлению эффективного управления напряжениями в изделиях.

Были проведены исследования влияния пульсирующего дозвукового водовоздушного потока на напряжения в стали 40X при закалке и уровня остаточных напряжений в стандартно закалённых изделиях после отпуска с импульсной обработкой. Исследования проводились на экспериментальной установке, генерирующей воздушные и водовоздушные пульсирующие потоки.

Нагретый до температуры закалки, составляющей для стали 40X 860 °С, образец помещался в установку. Скорость охлажде-

ния регулировалась изменением расхода охлаждающей жидкости, в качестве которой использовалась вода, диспергируемая пульсирующим газовым потоком.

В ходе оценки воздействия пульсирующего дозвукового водовоздушного потока на сталь в процессе закалочного охлаждения были проведены исследования её влияния на уровень напряжений и деформаций при закалке.

Сравнение величин напряжений при стандартной и экспериментальной обработках осуществлялось с помощью образцов из стали 40X длиной 52 мм и поперечным сечением 4,2×2,3 мм. Максимальный прогиб образцов под действием закалочных напряжений составил 0,06 мм при стандартной закалке в масле и 0,02 мм при закалке в пульсирующем дозвуковом водовоздушном потоке.

Среднее значение наибольших тангенциальных остаточных напряжений в образцах Френча, закалённых в масле, составило –90,5 МПа. Среднее значение максимальных тангенциальных остаточных напряжений в образцах, закалённых в установке под воздействием пульсирующего водовоздушного потока, составило 32,6 МПа, что свидетельствует о преобладании в них фазовых остаточных напряжений. Это может быть объяснено более полным превращением аустенит-мартенсит при закалке в пульсирующем водовоздушном потоке, о чём говорит повышение твёрдости с 53 единиц HRC после закалки в масле до 55 единиц HRC после закалки в установке.

Низкое значение фазовых остаточных напряжений является результатом значительной дисперсности продуктов мартенситного превращения по сравнению со стандартной закалкой и соответственно меньших напряжений и деформаций, вызванных структурными превращениями, а также релаксацией остаточных напряжений под действием пульсирующего водовоздушного потока: по всему объёму возникают колебательные напряжения, изменяющиеся в пределах амплитудных значений от $-_{\max}$ до $+_{\max}$ с частотой, пропорциональной частоте колебаний параметров газового потока. Максимальные суммарные значения напряжений возникают в местах концентраторов остаточных напряжений, что способствует наряду с общим уменьшением уровня остаточных напряжений и снижению их числа.

В дальнейшем были проведены исследования воздействия пульсирующих воздушных струй в процессе охлаждения после отпуска стандартно закалённых в масле образцов из стали 40X на уровень остаточных напряжений. Данные, полученные с помощью колец Френча, показывают, что остаточные напряжения после отпуска с импульсной обработкой в среднем на 35% меньше, чем остаточные напряжения в образцах, не подвергавшихся импульсному воздействию. Нагрев при отпуске уменьшает сопротивление движению дислокаций и облегчает их перемещение под воздействием пульсирующего воздушного потока, а значит, и релаксацию остаточных напряжений, а кроме того, происходит сглаживание неравномерности распределения остаточных напряжений, приводящей к поводкам и короблениям. В результате, распределение остаточных напряжений становится более плавным, поэтому релаксация с течением времени оставшихся равномерно распределённых остаточных напряжений не будет приводить к неравномерным деформациям, а изменение размеров изделия будет сведено к минимуму при сохранении его формы.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что воздействие пульсаций воздушного или водовоздушного потока позволяет снизить уровень напряжений в металлических изделиях и уменьшить деформации. При этом охлаждающая способность установки может варьироваться от скорости, превышающей скорость охлаждения в масле, до скорости охлаждения воздушным потоком.

Список литературы

1. Булычев А.В., Иванов Д.А. Воздействие газоимпульсной обработки на структуру, свойства и напряженное состояние металлических изделий // *Технология металлов*. – 2013. – № 11. – С. 30–33.
2. Воробьева Г.А., Иванов Д.А., Сизов А.М. Упрочнение легированных сталей термоимпульсной обработкой // *Технология металлов*. – 1998. – № 2. – С. 6–8.
3. Иванов Д.А. Повышение конструктивной прочности машиностроительных сталей путем импульсного воздействия при отпускном охлаждении // *Двигателестроение*. – 2005. – № 4. – С. 30–32.
4. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Газоимпульсная обработка машиностроительных материалов без предварительного нагрева // *Двигателестроение*. – 2010. – № 2. – С. 20–22.
5. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Повышение конструктивной прочности машиностроительных материалов в результате соhetания термической и газоимпульсной обработки // *Двигателестроение*. – 2012. – № 3. – С. 12–15.
6. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Обработка пульсирующим газовым потоком высокопрочных и пружинных сталей // *Двигателестроение*. – 2014. – № 3. – С. 34–36.
7. Иванов Д.А. Прокаливаемость сталей при закалке в пульсирующем дозвуковом воздушном и водовоздушном потоке // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2010. – № 11. – С. 50–53.
8. Иванов Д.А. Повышение конструктивной прочности металлических материалов путём их обработки нестационарными газовыми потоками без предварительного нагрева // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2011. – № 4. – С. 24–29.
9. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Использование газоимпульсной обработки в процессе термического упрочнения деталей бытовых машин // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2012. – № 4. – С. 33–37.
10. Иванов Д.А. Воздействие газоимпульсной обработки на структуру и механические свойства нормализуемых сталей // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2013. – № 3. – С. 19–22.

References

1. Bulychev A.V., Ivanov D.A. Vozdejstvie gazoimpulsnoj obrabotki na strukturu, svojstva i napryazhennoe sostoyanie metallicheskih izdelij // *Texnologiya metallov*. – 2013. – № 11. – pp. 30–33.
2. Vorobeveva G.A., Ivanov D.A., Sizov A.M. Uprochnenie legirovannyx stalej termoimpulsnoj obrabotkoj // *Texnologiya metallov*. – 1998. – № 2. – pp. 6–8.
3. Ivanov D.A. Povyshenie konstruktivnoj prochnosti mashinostroitelnyx stalej putem impulsnoho vozdejstviya pri otpusknom oxlazhdenii // *Dvigatellestroenie*. – 2005. – № 4. – pp. 30–32.
4. Ivanov D.A., Zasukin O.N. Gazoimpulsnaya obrabotka mashinostroitelnyx materialov bez predvaritel'nogo nagreva // *Dvigatellestroenie*. – 2010. – № 2. – pp. 20–22.
5. Ivanov D.A., Zasukin O.N. Povyshenie konstruktivnoj prochnosti mashinostroitelnyx materialov v rezultate sochetaniya termicheskoj i gazoimpulsnoj obrabotki // *Dvigatellestroenie*. – 2012. – № 3. – pp. 12–15.
6. Ivanov D.A., Zasukin O.N. Obrabotka pulsiruyushhim gazovym potokom vysokoprochnyx i pruzhinnyx stalej // *Dvigatellestroenie*. – 2014. – № 3. – pp. 34–36.
7. Ivanov D.A. Prokalivaemost stalej pri zakalke v pulsiruyushhem dozvukovom vozduzhnom i vodovozduzhnom potoke // *Texniko-technologicheskie problemy servisa*. – 2010. – № 11. – pp. 50–53.
8. Ivanov D.A. Povyshenie konstruktivnoj prochnosti metallicheskih materialov putyom ix obrabotki nestacionarnymi gazovymi potokami bez predvaritel'nogo nagreva // *Texniko-technologicheskie problemy servisa*. – 2011. – № 4. – pp. 24–29.
9. Ivanov D.A., Zasukin O.N. Ispolzovanie gazoimpulsnoj obrabotki v processe termicheskogo uprochneniya detalej bytovyx mashin // *Texniko-technologicheskie problemy servisa*. – 2012. – № 4. – pp. 33–37.
10. Ivanov D.A. Vozdejstvie gazoimpulsnoj obrabotki na strukturu i mexanicheskie svojstva normalizuemyx stalej // *Texniko-technologicheskie problemy servisa*. – 2013. – № 3. – pp. 19–22.