

ЗОХГТ - закалка 840-850 °С в масле, отпуск при 570-590°С, твердость НВ 217-230; 3) токарная обработка; 4) стабилизирующий отпуск при 580-600 °С, выдержка 8 ч, охлаждение с печью; 5) шлифование; 6) азотирование: температура 500-520 °С, выдержка 36 ч, степень диссоциации аммиака 15-25 %, охлаждение при непрерывной подаче аммиака до 200 °С; стали 40ХФА и ЗОХГТ - глубина слоя 0,35-0,45 мм, твердость HRC 56-58; 7) шлифование или доводка.

Последовательность операций технологического процесса изготовления скалок, колонок и осей: 1) обдирка с припуском 2-2,5 мм на диаметр; 2) улучшение: сталь 38ХМЮА или 38ХВФЮА - закалка 930-950 °С, отпуск при 650-670 °С, выдержка 2 ч, твердость НВ 270-300; 3) токарная обработка; 4) стабилизирующий отпуск при 580-

600 °С, выдержка 8 ч, охлаждение с печью; 5) шлифование; 6) азотирование: температура 500-520 °С, выдержка 36 ч, степень диссоциации аммиака 15-25 %, глубина слоя 0,3-0,35 мм, твердость HRC 64-67; 7) шлифование или доводка.

Таким образом, прогрессивные методы термической обработки ответственных стальных деталей штампов обеспечивают минимальное коробление и износостойкость деталей в эксплуатации.

Литература

Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т./Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1985.

Ж. "Металлообработка" № 5, 2001

АЭРОТЕРМОАКУСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

*В.К. Ерофеев, к.т.н., Г.А. Воробьева, к.т.н., П.Г. Генкин, аспирант,
Балтийский государственный технический университет
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

Современный уровень отечественной технологической науки в большинстве отраслей промышленности, в частности, в металлургии и машиностроении не отвечает требованиям сегодняшней рыночной экономики (большие энергозатраты, низкое качество, высокая стоимость и т.д.). Разработкой прогрессивных технологий упрочнения металлов и сплавов занимаются ученые и практики во многих странах. При этом используются новейшие достижения, полученные в различных областях науки (теплообмена, газодинамики, акустики, физики твердого тела, термодинамики и т.д.). Особое внимание при создании новых наукоемких технологий уделяется комбинированным средствам воздействия (температурные и силовые поля, криогенная, лазерная, многоциклическая обработка и т.д.) [1,2,3].

В настоящей работе представлены результаты исследований аэротермоакустического воздействия на металлы и сплавы, приведены описания созданных на этой основе технологических процессов. Основными операциями в предложенных технологиях являются нагрев деталей (заготовок) до определенных температур и последующее охлаждение, включая криогенное воздействие, в мощном акустическом поле звукового диапазона дискретных частот с уровнями звукового давле-

ния 150-170 дБ и потоке газа (метод запатентован в 1999г.). Использованные газоакустические системы являются разработкой авторов.

В результате проведенных исследований были разработаны и апробированы в лабораторных условиях следующие варианты технологических процессов, использующие операции стандартной термообработки (СТО) и аэротермоакустическую обработку (АТАО): нагрев для закалки с последующим охлаждением в акустическом поле и стандартным отпуском; стандартная закалка, нагрев для отпуска с последующим охлаждением в акустическом поле; полная СТО, нагрев для отпуска (низкого) с последующим охлаждением в акустическом поле.

Охлаждение нагретых деталей с наложением звукового поля и газового потока может быть реализовано по двум вариантам в зависимости от габаритов деталей и целей обработки:

1) охлаждение в резонаторе газоструйного генератора звука (максимальные уровни звукового давления и минимальные скорости потока газа);

2) охлаждение в газоструйной системе с наложением звуковых колебаний (средние уровни звукового давления и большие скорости потока, удобен для крупногабаритных деталей).

Управление параметрами аэротермоакустиче-

ского воздействия (температуры, скорости охлаждения, скорости потока газа, амплитудно-частотных характеристик) осуществлялось за счет варьирования геометрических характеристик установок, параметров рабочего газа (воздух, азот и др.), времени термоакустического воздействия, введения дополнительных охлаждающих средств (впрыск жидкости) и т.д. Экспериментальные оценки эффективности охлаждения сред, используемых при АТАО, показали, что они близки к эффективности масел. Для повышения эффективности охлаждения использовались водовоздушные смеси.

Экспериментальные исследования и опытная отработка технологий проводилась на стандартных образцах, деталях и инструменте, изготовленных из различных конструкционных и инструментальных сталей и сплавов (углеродистых и легированных): 65Г, 8Х4В2С2МФ, 40, 45, У8, У8А, У10, 40Х, 40ХС, 30ХМА, 60С2А, 20Х13, Р6М5, Р9, Р18, ВК8, ВК10, Т15К6 и др. Были выполнены сравнительные (статические и динамические) испытания образцов, прошедших СТО и АТАО, в результате которых определялись характеристики прочности и пластичности. Для проверки обработанного инструмента (режущего

и штампового) проводились испытания на износостойкость.

С целью изучения структурных изменений в металле использовались визуальные методы оптической и электронной фотографии и фратографии, а также проводились механические испытания. В табл. 1 приведены результаты сравнительных испытаний стали 40Х.

Результаты свидетельствуют, что АТАО на стадии закалки с последующим отпуском при $t=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ обеспечивает повышение прочности без снижения пластичности и вязкости. Тот же вариант закалки, но с отпуском при $t=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с аналогичной СТО улучшает прочностные характеристики (HRC , σ_b , $\sigma_{0,2}$) и практически не ухудшает характеристик пластичности (δ , ψ). Использование АТАО на стадии отпуска повышает характеристики прочности и пластичности стали за счет ускорения диффузионных процессов при существенном сокращении времени обработки (примерно в 3 раза).

Важной характеристикой является прокаливаемость стали, которая в данном случае увеличилась на 20-28 %.

Таблица 1

Режим обработки	Твердость HRC_3 после закалки	Режим отпуска	Твердость HRC_3	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/м ²
СТО	56	550°C 0,5 ч	33-35	1180	1120	12	52	70
		550°C 0,5 ч	30-32	1170	1080	13	56	80
		600°C 0,5 ч	20-23	1020	930	14	58	115
АТАО	56-58	550°C 0,5 ч	35	1290	1215	13	56	80
		550°C 0,5 ч	32-34	1200	1140	13	56	120
		600°C 0,5 ч	-	1060	980	13	60	120

Результаты получены по измерениям твердости в сечениях закаливаемых образцов (\varnothing 25-40 мм, $l=150$ мм), разрезаемых на расстояниях 20 и 40 мм от торца. D_{50} для стали 40Х - 40 мм, что больше, чем при охлаждении ее в масле, HRC 50-52 в центре образцов. Повышение прокаливаемости связано тем, что при использовании АТАО вместо растягивающих напряжений (как при закалке в масле) в стали возникают сжимающие напряжения, что и определяет увеличение прокаливаемости стали [4].

Для определения влияния АТАО на хладостойкость стали, и чувствительность к отпускной хрупкости II рода были проведены испытания на ударный изгиб (образцы с U-образным и V-

образным надрезами). После отпуска (температура более 500 °C) образцы охлаждались по нескольким вариантам: на воздухе, вместе с печью, в воде. Испытания на хладостойкость проводились при температурах от +20 до -100 °C. Результаты подтвердили, что при всех температурах ударная вязкость стали, прошедшей обработку, выше, чем у стандартной

Необходимо отметить, что ударная вязкость образцов, охлажденных с печью после отпуска, в области температур от -60 до -100 °C выше, чем у образцов, подвергнутых стандартной закалке и отпуску с последующим охлаждением в воде. Эти результаты свидетельствуют о том, что АТАО практически устраняет чувствительность стали к

отпускной хрупкости II рода. Кроме того, судя по содержанию волокна в изломе ударных образцов (В, %), определенных по стандартной методике (ГОСТ 4543-71) порог хладостойкости стали 40X после обработки становится равным $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ при охлаждении на воздухе после отпуска и $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ при закалке в масле и охлаждении в воде после отпуска. Испытания на хладостойкость в интервале температур от $+20$ до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ выявили, что АТАО при закалке снижает температуру перехода стали в хрупкое состояние (T_{50}) с $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исследование структурных изменений в металле проводилось путем фрактографического исследования изломов образцов. Установлено, что при температуре испытаний $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ поверхность изломов образцов, прошедших АТАО состоит из зон квазискола, гребней и участков ямочного строения. При варианте обычной закалки участки скола, квазискола, межзеренного разрушения формируют поверхность излома со сравнительно плоскими фасетками.

АТАО способствует формированию поверхности излома, свидетельствующей о том, что разрушение образцов происходит не в строго ориентированном направлении: помимо магистральной трещины возникают и микротрещины, ориентированные к ней под разными углами. Это способствует увеличению энергоемкости разрушения вследствие усложнения рельефа излома. Кроме того, образование ступенек на плоскостях скола связано с большими затратами энергии, чем формирование гладкой поверхности излома. После АТАО в стали может происходить вязкое торможение микротрещин вследствие релаксации напряжений в вершине трещин, если они переходят субзерно. Торможение трещины обусловлено затратами энергии на разрушение фрагментированной структуры в узкой зоне, непосредственно примыкающей к микротрещине.

Наличие в стали, подвергнутой АТАО, участков прохождения трещин через тело субзерен позволяет объяснить повышение энергии разрушения торможением микротрещин. При пересечении микротрещиной границы ячейки ее скорость уменьшается, и вследствие микропластической деформации происходит затупление вершин трещины.

АТАО осуществлялась и в процессе охлаждения после отпуска закаленной стали 40X. При температурах высокого и низкого отпуска АТАО в процессе охлаждения способствует повышению пластичности стали за счет ускорения диффузи-

онных процессов. Ускорение диффузионных процессов (о чем говорилось выше) приводит к уменьшению числа карбидов, имеющих пластинчатую форму, что содействует повышению механических свойств. Кроме того, на повышение механических свойств влияют еще ряд факторов, в числе которых релаксация пиковых напряжений на границах фаз путем эстафетной передачи деформации в ненапряженные микрообъемы, возможное увеличение подвижности дислокации за счет отрыва от мест закрепления и т. д. Это позволяет сократить время отпуска при температурах $500-600\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 40 мин вместо 1,5 ч при стандартной термической обработке.

Повышая пластичность стали после низкого отпуска (при некотором повышении прочности), АТАО расширяет возможности использования стали типа 40X в высокопрочном состоянии. Механические свойства стали 40X, подвергнутой АТАО по этому режиму, практически не ниже, чем после высокотемпературной термомеханической обработки.

АТАО оказывает влияние на формирование структуры аустенита и мартенсита. Измельчение кристаллов и блоков мартенсита обеспечивает благоприятное изменение свойств, как при комнатной, так и при отрицательных температурах (снижается температура перехода стали в хрупкое состояние 750 на $30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Повышение прочности конструкционных сталей после АТАО, проводимой на стадии закалки, может быть связано с фрагментацией зерен аустенита. Уменьшение размера фрагментов зерен аустенита и увеличение угла их разориентировки увеличивает сопротивления пластической деформации [5]. Ускорение диффузионных процессов под воздействием АТАО в процессе охлаждения после отпуска способствует значительному увеличению пластичности.

Результаты механических испытаний стали 45, проведенных после СТО и АТАО показали, что дополнительная АТАО позволяет повысить прочностные характеристики на 5-15 %, практически не ухудшая пластичности металла, существенно снизить пороги хладостойкости (на $\approx 30\%$).

Испытания режущего инструмента из стали Р6М5 после АТАО показали увеличение износостойкости в 1,5-4 раза, это связано с уменьшением количества остаточного аустенита в стали, уменьшением и перераспределением остаточных напряжений.

Существенное влияние АТАО на твердость

(HV) сталей 8X4B2C2MФ, 9ХС.

Металлографические исследования показали значительное измельчение зеренной структуры (почти в 2 раза) и уменьшение размеров карбидов. Измельчение зерна и карбидной фазы приводит к повышению уровня вязкости стали, увеличению количества волокон в изломе [5].

АТАО также была использована для обработки ковких чугунов с целью устранения распространенного дефекта ("отбела"), не позволяющего обрабатывать детали резанием. Использование АТАО (метод запатентован в 2000 г.) позволило существенно упростить технологию и сократить время устранения брака "отбела", после чего чугун поддается обработке резанием.

Все варианты использования АТАО выполнялись без использования охлаждающих жидкостей (масел, полимеров и т.д.), как правило, экологически вредных и подлежащих сложной и дорогостоящей утилизации.

Таким образом, предложен и прошел лабораторную апробацию новый метод целенаправленного управления структурными и механическими свойствами металлов и сплавов. Отработаны отдельные варианты технологических процессов и технологического оборудования, отличающиеся относительной простотой, низкой стоимостью и экологической чистотой. Имеется конструкторская и технологическая документация. Современное состояние разработок позволяет использовать

их в промышленности. Работы по данному направлению продолжаются. Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке ФЦП "Интеграция" (проект А0135).

Литература

1. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение металлов. Справочник. - М.: Машиностроение, 1981. - С. 320.
2. Смагоринский М.Е., Булянда А.А., Кудряшов С.В. Справочник по термомеханической и термоциклической обработке металлов. - СПб.: Политехника, 1992. - С. 416.
3. Ерофеев В. К., Никитин И. Е. Использование мощных звуковых полей при термообработке сталей /Проблемы обеспечения качества изделий в машиностроении: Сб. науч. тр. - Красноярск: Изд-во КГТУ, 1994. - С. 302-305.
4. Лошкарёв В. Е. Математическое моделирование процесса закалки с учетом влияния напряжения на структурные превращения в стали //Металловедение и термическая обработка. - 1986. - № 1. - С. 2.
5. Лысяк Л.И., Николин Б.И. Физические основы термической обработки стали. - Киев: Техника, 1975. - С. 60.
6. Бахарев О.Г. Металлофизика, - М.: Металлургия, 1989. - № 6. - Т. 2. - С. 78.

Журнал "Металлообработка", № 6, 2001

ЗНАМЕНАТЕЛЬНЫЕ ДАТЫ

АВГУСТ

7.08. - 90 лет назад было открыто космическое излучение. Во время подъема воздушного шара на высоту 5000 метров австрийский физик Виктор Франс Гесс установил, что ионизация воздуха с высотой возрастает. Это позволило прийти к выводу о наличии неизвестного до сих пор космического излучения.

12.08. - 115 лет назад родился Эрвин Шредингер (ум. 1961), австрийский физик и лауреат Нобелевской премии 1933г. Он развивал волновую механику и разработал главные положения квантовой и атомной теории, сделал важный шаг в естествознании на пути к "солярной" картине мира и ее осознанию.

13.08. - 100 лет со дня рождения Феликса Ванкеля (ум. 1988),

немецкого инженера и изобретателя, создателя оригинального роторно-поршневого двигателя внутреннего сгорания.

19.08. - 340 лет назад умер Блез Паскаль (род. 1623), математик и физик, называвший человека "мыслящим тростником", философ, писатель.

23.08. - 620 лет назад началась оборона Москвы от Тохтамышша. Тогда впервые на Руси применена в бою артиллерия.

24.08. - 170 лет назад умер Никола Леонар Сади Карно (род. 1796), французский физик, один из основателей термодинамики.

27.08.1874 - родился Карл Бош (ум. 1940), немецкий химик, лауреат Нобелевской премии 1931г. Создал первую промышленную установку синтеза аммиака на

железном катализаторе.

30.08. - 150 лет со дня рождения Якобуса Хванта Хоффа, нидерландского физика, химика, первого лауреата Нобелевской премии по химии 1901г., изучал расположение молекул, считается основателем стереохимии.

30.08. - 90 лет назад родился Эдвард Перселл, американский физик, лауреат Нобелевской премии 1952г.

30.08. - 65 лет назад родился Брюс (Лесли) Макларен (ум. 1970), автогонщик "Формулы-1", конструктор гоночных автомобилей знаменитой теперь фирмы. В 1959 г. Макларен стал самым молодым победителем этапа автомобильной "Формулы-1". Погиб конструктор в аварии при испытаниях новой модели.