***УДК 669.1(075.8)***

***Анализ факторов, влияющих на величину остаточных напряжений и механические свойства сплавов при термической обработке и холодной пластической деформации.***

# Г. А. Воробьева, канд. техн. наук, профессор, (E-mail:Vorobiyova\_[Galina@mail.ru](mailto:Galina@mail.ru)); Е. Ю. Ремшев\*,канд. техн. наук, доцент (E-mail:Remshev@mail.ru);З.Н.Расулов аспирант, инженер кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем»,Лихошерстных И.А. магистр кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Рос­сия,Санкт -Петербург, 196005, 1ая Красноармейкая д. 1.

*Analysis of factors affecting the value of residual stresses and mechanical properties of alloys during heat treatment and cold plastic deformation.*

*Vorobyova G.A.,Remshev E.Y.,Rasulov Z.N.,Lihosherstnih I.A.*

Аннотация

Рассмотрено влияние стандартной термической, аэротермоакустической обработки и нанесения фтор-ПАВ покрытия на механические свойства и величину остаточных напряжений, возникающих в процессе упрочняющих и формообразующих обработок конструкционной стали 40Х и титанового сплава ВТ23. Прослежена связь между величиной остаточных напряжений и механическими свойствами сплавов. Показаны возможности аэротермоакустической обработки обеспечивать повышение прочности сплавов с одновременным повышением пластичности за счет уменьшения величины остаточных напряжений вследствие протекания процессов микропластической деформации при проведении аэротермоакустической обработки и нанесения фтор-ПАВ покрытия.

Ключевые слова: конструкционная сталь, титановые сплавы, термическая обработка, аэротермоакустическая обработка, остаточные напряжения ,механические свойства.

*The influence of the standard heat, aerothermoelasticity processing and application of fluorine-surfactant coatings on the mechanical properties and the magnitude of the residual stresses arising in the process of strengthening and shaping treatments structural steel 40X and titanium alloy BT23]. The connection between the value of residual stresses and mechanical properties of alloys is traced. The possibilities of aerothermoacoustic treatment to increase the strength of alloys with simultaneous increase in plasticity by reducing the residual stresses due to the processes of microplastic deformation during aerothermoacoustic treatment and application of fluorine surfactant coating are shown.*

*Keywords: structural steel, titanium alloys, heat treatment, aerothermoacoustic treatment, residual stresses ,mechanical properties.*

1. **Введение.** Долговечность деталей машин определяется их прочностью в условиях воздействия статических, динамических и циклических нагрузок, агрессивных сред и сопротивлением изнашиванию. Различие свойств образцов и деталей, изготовленных из одного и того же материала обуславливается многими факторами, в том числе наличием в деталях остаточных напряжений. Реальные условия нагружения характеризуются взаимодействием полей временных и остаточных напряжений. Важность информации о величине, знаке и распределении остаточных напряжений (ОН) очень важна в связи с их влиянием на работоспособность деталей при различных нагрузках, а также на вероятность возникновения дефектов при проведении термической обработки (трещинообразование, деформации и коробление) и холодной пластической деформации (хпд): трещинообразование и низкая пластичность.

Остаточными напряжениями принято называть напряжения, которые существуют и уравновешиваются внутри твердого тела после устранения причин, вызвавших их появление. Образование ОН всегда связано с неоднородными линейными или объемными деформациями в смежных объемах материала или агрегата; ОН чувствительны к внешним воздействиям и участвуют в определенной степени во всех процессах, происходящих в металле на макро и микроуровнях, существенно влияют на надежность и долговечность техники, на технологичность и долговечность конструкций. Металлургические полуфабрикаты за счет ОН при хранении могут изменять размеры вплоть до разрушения, что при последующей механической обработке приводит к нерациональному использованию металла. Остаточные напряжения влияют на статическую, динамическую прочность и коррозионную стойкость металлических материалов. Важной является проблема оценки допустимого уровня напряжений, возникающих при проведении технологических операций: закалки стали и хпд сталей и сплавов[1,2]. Качественная оценка уровня допустимых ОН при закалке в новых средах может быть получена при сопоставлении с литературными данными по закалке в традиционных средах. Количественная оценка предусматривает использование определенного критерия прочности, которым может быть величина ОН, которые связаны с упругими деформациями, существующими в металле после полного прекращения внешних воздействий на металл.

Актуальной является как разработка технологий, позволяющих уменьшать уровень ОН в процессе проведения упрочняющей или формообразующей технологии до требуемого уровня так и анализ влияния на величину ОН упрочняющей аэротермоакустической обработки (АТАО)[3].

**2.Материал и методики проведения исследования.**

Уровень остаточных напряжений и механических свойств в зависимости от способа термической обработки оценивался на стали 40Х после стандартной закалки с охлаждением в масле и при воздействии водовоздушной смеси и акустического поля в процессе закалки на стадии охлаждения(АТАО). В качестве перспективного метода, относящегося к технологиям, формирующим структуру и свойства материалов, в том числе обеспечивающим упрочнение практически без снижения пластичности, рассматривается аэротемоакустическая обработка (АТАО), заключающаяся в одновременном, комплексном воздействии термических напряжений и акустических полей на материал заготовки или изделия[ 2]. АТАО может быть реализована как в процессе термической обработки (закалки или отпуска) так и после полного цикла стандартной обработки или на промежуточном этапе (например, между закалкой и отпуском или старением). Применение АТАО позволяет влиять на свойства сплавов как на основе железа (конструкционных, пружинных, инструментальных сталей), так и на основе других металлов (алюминия , титана, меди)[3-6 ].

При использовании АТАО в процессе проведения закалки сталей режим охлаждения (как и при традиционной закалке) должен обеспечить критическую скорость охлаждения и необходимую глубину прокаливаемости стали. В то же время режим охлаждения должен быть таким, чтобы не возникали сильные закалочные напряжения, приводящие к короблению изделий и образованию закалочных трещин. При традиционной закалке сталей в качестве охлаждающих сред могут быть использованы вода, водные растворы солей, щелочей, полимеров, масло, водовоздушная смесь, поток воздуха, высокоскоростные струи воздуха и инертных газов. Выбор охлаждающей среды определяется ее охлаждающей способностью, диапазоном ее регулирования, уровнем внутренних напряжений в изделии и рядом других параметров. Используемые для легированных сталей закалочные среды (минеральное масло, водные растворы полимеров) не всегда обеспечивают необходимый уровень механических свойств, значительна величина остаточных напряжений и деформаций в материале, эти среды охлаждения достаточно дороги и, кроме того, их утилизация требует дополнительных расходов.

Необходимая скорость охлаждения при проведении АТАО обеспечивается использованием одной из двух схем охлаждения: с одновременным акустическим воздействием определенных параметров: в потоке воздуха или водовоздушной смеси. В данном исследовании охлаждение при проведении закалки стали 40Х осуществлялось в потоке водовоздушной смеси, а отпуска в потоке воздуха с одновременным воздействием акустического поля в обоих вариантах обработки.

Остаточные напряжения определялись на стали 40Х механическим методом с помощью специальных образцов (кольца Френча). Задача механических методов определения остаточных напряжений состоит в том, чтобы по известной совокупности перемещений или деформаций определить вызвавших их напряжений на поверхности среза. Переменное сечение образца обеспечивает неравномерность охлаждения, а, следовательно, и деформации. В результате более быстрого охлаждения тонкой части образца происходит ее упругий изгиб при последующем охлаждении утолщенной части образца. Величина остаточного напряжения рассчитывается по формуле

σ = α*Е*ε, (1)

где α – коэффициент, связывающий форму кольца и деформацию кольца, в условиях чистого изгиба он равен 0,00168 мм -1; *Ε* – модуль упругости МПа; ε – деформация кольца после разрезки в области пропила между точками *А* и *В*; σ – остаточные напряжения, МПа.

Уровень остаточных напряжений определялся на образцах из сплава ВТ23 как в исходном (состояние поставки), закаленном состоянии, так и после дополнительных обработок: аэротермоакустической(АТАО) и нанесенной фторорганической нанокомпазицией - поверхностно-активного вещества ( ПАВ). Уровень ОН оценивался с помощью резистивного электроконтактного способа измерения, когда регистрируется эффективное удельное сопротивление с дальнейшим пересчётом в остаточные напряжения. Измерения производили на приборе Резикон (ЦКП «Центр исследования материалов» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова). РЕЗИКОН – прибор неразрушающего контроля для определения остаточных напряжений в изделиях из металлов.

Механические свойства сплава Вт23 определялись на стандартных цилиндрических образцах, изготовленных из прутка диаметром 8мм, а стали 40Х на стандартных пятикратных образцах ; испытания на статическое растяжение проводились на машине модели AGX–100kN, SHIMADZU.

**3. Результаты и обсуждение.**

Для анализа влиянияАТАО намеханические свойства конструкционных сталей образцы на статическое растяжение и динамический изгиб подвергались стандартной термической обработке – СТО и АТАО, которая осуществлялась в процессе закалочного охлаждения или после выдержки при нагреве во время отпуска. Режимы обработки (термической и АТАО) образцов из стали 40Х и результаты механических испытаний представлены в табл.1. Закалка для всех режимов обработки производилась с температуры 860ºС.Стандартный режим охлаждения (СТО) при проведении термической обработки: масло – при закалке, воздух - при отпуске. АТАО-1 –обработка в процессе охлаждения при закалке: в :потоке водовоздушной смеси + акустическое поле; АТАО-2 обработка в процессе охлаждения при отпуске : в потоке воздуха + акустическое поле. При закалке стали 40Х твердость 50-51 HRC соответствует ~85% мартенсита, 52 -54 HRC соответствует ~ 90-95% мартенсита и достигается при охлаждении в масле и в потоке водовоздушной смеси с акустическим полем. Прокаливаемость стали 40Х в сечении 25мм соответствует прокаливаемости в масле так как твердость при охлаждении в процессе закалки в потоке водовоздушной смеси с акустическим полемодинаковая по сечению заготовки диаметром 25мм и соответствует 52 -54 HRC.

Таблица 1.

Механические свойства стали 40Х после термической и аэротермоакустической обработок.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № ,режима  обработки | Твердость, HRC | | | | | σв | σ0,2 | δ | Ψ | KCU Дж/см2 |
| Закалка, среда охл. | | Отпуск, т-раºС, время  выдержки , среда охл. | | | МПа | | % | % |
| 1.(СТО) | 52 | масло | 200,  2 часа | воздух. | 50 | 1780 | 1543 | 4 | - | 29 |
| 2.(АТАО-1) | 54\* |  | 50 | 1767 | 1653 | 4 | 8 | 50 |
| 3.(АТАО-2) | 52 | масло | воздух+а.о. | 50\* | 1813 | 1643 | 4,7 | 8.3 | - |
| 4.(АТАО-2) | 52 | масло | 200, 1,5часа +300  (7мин.) | воздух +а.о. | 50\* | 1960 | 1680 | 11,5 | 31 | 38 |
| 5.(СТО) | 52 | масло | воздух | 50 | 1800 | 1550 | 10 | 28 | 23 |
| 6.(АТАО-2) | 52 | масло | 250,  1час, | 1час,  воздух+а.о. | 50\* | 1950 | 1690 | 10 | 28 | 43 |
| 7. (СТО) | 52 | масло | воздух | 50 | 1870 | 1640 | 10 | 28 | 28 |

* Обозначены значения свойств, полученных при использовании АТАО.

При обработке на высокопрочное состояние машиностроительных сталей: σ0,2 ≥1600МПа, δ ≥ 8-9%, с уровнем значений ударной вязкости KCU ≥ 40 Дж/см2 наиболее высокие значения предела текучести можно получить при обработке по режимам № 4 и 6, в процессе проведения отпуска которых охлаждение после нагрева и выдержки при отпуске осуществлялось в потоке воздуха с воздействием акустического поля (АТАО-2). Обработка по режиму №2 (АТАО-1) в процессе закалочного охлаждения ( охлаждение в потоке водовоздушной смеси + акустическое поле) позволяет повысить σ0,2 на 110МПа и ударную вязкость, без снижения пластичности по сравнению с закалкой в масле, что дает возможность применения стали после этой обработки в отсутствии растягивающих нагрузок. Остаточные напряжения, возникающие при закалке стали делят на структурные и тепловые, последние обусловлены температурной зависимостью удельного объема сплава, градиентом температур по сечению термически обрабатываемого изделия, зависят от размеров и формы изделий. Структурные напряжения возникают из-за объемных изменений при фазовых превращениях и неравномерности их протекания в различных микрообъемах. Следовательно, напряженное состояние детали определяется распределением структурных и тепловых напряжений. Решающее влияние на величину и распределение суммарных ОН оказывает перемена знака тепловых напряжений по отношению ко времени появления структурных. Если структурные напряжения появляются до перемены знака тепловых то величина суммарных ОН уменьшаются и наоборот, так как исследования показали, что чисто структурные напряжения имеют знак противоположный тепловым (на поверхности обычно растягивающие, а в сердцевине сжимающие). На величину ОН после фазовых превращений оказывает влияние химический состав, температура нагрева и скорость охлаждения, величина их существенно зависит от размера зерна, при крупном зерне величина их может быть в 3…4 раза больше, чем при мелком[7]. Остаточные напряжения классифицируют по протяженности теплового поля. Напряжения 1 рода уравновешиваются в пределах областей, размеры которых одного порядка с размерами тела. Они вызваны неоднородностью силового или температурного поля внутри тела (в зависимости от своей природы) и характеризуются при их обнаружении по способу разрезки – деформацией (короблением) отрезанных элементов Для определения остаточных напряжений образцы Френча из стали 40Х подвергались закалке с охлаждением в масле и АТАО (охлаждение в водовоздушной среде и при воздействии акустического поля). Твердость в обоих случаях составляла 54…58HRC и была равномерной по сечению. Деформация после термической обработки стали 40Х определялась на образцах с сечением 4,2×2,3 и длиной 42 мм. Измерение прогиба центральной части образца проводилось с помощью индикаторного прибора. Значения величин остаточных напряжений и деформаций после закалки стали 40Х и 12Х18Н9Т приведены в табл. 2.

Таблица2

Значения остаточных напряжений и деформаций в стали 40Х и сплаве 12Х18Н9Т после закалки.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка стали | Режимы обработки | | Твердость | σ ост. | Прогиб после закалки |
| Температура нагрева, °С | Среда охлаждения | HRC  (HRB) | МПа | мм |
| 40Х | 860 | масло | 54-56 | 90,5 | 0,06 |
| АТАО 1 | 56-58 | -32,5 | 0÷ 0,02 |
| 12Х18Н9Т | 900 | Вода | (70-80) | 37,5 | - |
| АТАО 1 | (70-80) | -25,0 | - |

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что применение АТАО влияет на величину и знак остаточных напряжений : величина остаточных напряжений уменьша-ется ~ в 2,5 раза при применении АТАО и знак остаточных напряжений меняется, на поверхности возникают сжимающие напряжения. Уменьшение остаточных напряжений позволяет повысить условный предел текучести при обработке по режиму №2 и уменьшить деформацию при применении АТАО1.Кроме того АТАО 1 является экологически чистой обработкой. Применение обработки АТАО2 в процессе отпуска (режим №6) позволяет не только повысить прочность стали без снижения пластичности по сравнению со стандартной обработкой (режим №6) , но и повысить ударную вязкость.

Для исключения влияния фазовых напряжений, возникающих при закалке стали 40Х, величина ОН определялась на кольцевых образцах, изготовленных из стали аустенитного класса 12Х18Н9Т, в которой отсутствует мартенситное превращение. Закалка образцов из стали 12Х18Н9Т осуществлялась в воде и по схеме АТАО1.Результаты определения ОН приведены в табл.2. При одинаковой твердости при использовании АТАО1 уровень остаточных напряжений ниже, чем при закалке в воде; изменился на противоположный и знак напряжений( табл.2).

Известно, что холоднотянутая проволока поступает к производителям пружин в крайне напряженном состоянии. Установлено, что абсолютные значения остаточных напряжений первого рода могут быть соизмеримы с величинами пределов текучести. Сплав ВТ23, используемый в пружинном производстве, поставляется после предварительной термической обработки и холодной пластической деформации в связи с чем целесообразно определить уровень ОН в сплаве. Исследовали образцы из сплава ВТ23 устройством, в основу которого положен принцип скин-эффекта (Резикон).Образцы титанового сплава, используемого в пружинном производстве подвергали обработке: аэротермоакустической(АТАО2) и фторорганической нанокомпазицией. После чего производили измерения ОН на приборе Резикон. Результаты исследования представлены на рис. 1 и в табл. 3

а)

б)

Рисунок 1 – Результаты измерения остаточных напряжений на приборе «Резикон»: а-ВТ23 в исходном состоянии,б-ВТ23 после аэротермоакустической обработки

Таблица 3.- Результаты измерения остаточных напряжений на приборе «Резикон» в сплаве ВТ23 после обработок по приведенным режимам

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Глубина измере-  ния остаточных  напряжений,  мкм | Величина остаточных напряжений, МПа | | | | | |
| исходное  состояние | закалка | комбинированная обработка АТАО | | покрытие ФТОР-ПАВ | |
| Обр.1 | Обр.2 | Обр.1 | Обр.2 |
| 249 | -2328 | -1977 | -424 | -228,71 | -2005,36 | -1728,10 |
| 352 | -1040 | -951 | -164 | -80,00 | -944,85 | -830,19 |
| 497 | -657 | -584 | -106 | -51,75 | -608,54 | -515,50 |
| 703 | -386 | -346 | -57 | -25,62 | -358,23 | -304,94 |
| 994 | -376 | -345 | -49 | -16,66 | -348,19 | -297,74 |

Приведенные в табл.3 значения ОН существенно зависят от исходного состояния сплава, особенно на глубине до 350 мкм и уменьшаются после закалки и нанесения фтор-пав покрытия на сплав. На глубине от 500мкм различие в значениях величин ОН после этих обработок незначительно. Наиболее существенное изменение ОН наблюдается при использовании комбинированной обработки АТАО2 во всем диапазоне измерений. При использовании АТАО1 величина ОН уменьшается на глубине до 250мкм уменьшается в 5-6раз по сравнению с исходным состоянием сплава.

Результаты механических испытаний образцов из сплава ВТ23 и средние значения остаточных напряжений после указанных выше обработок приведены в таблице 4.

Таблица 4

Механические свойства сплава ВТ23 и значения ОН.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Таблица 4Вид обработки  сплава | , МПа | , МПа | , % | σост. МПа на расстоянии от поверхности | |
| ~200мкм | ~1000мкм |
| 1.Исходный | 572 | 957 | 10,3 | -2400 | -300 |
| 2-1 ФТОР-ПАВ . Покрытие | 756 | 929 | 10,44 | - | - |
| 2-2 ФТОР-ПАВ Покрытие | 707 | 906 | 11,04 | - | - |
| 731 | 917 | 10,7 | -1700(-2005) | -300(-358) |
| 3-1 АТАО | 743 | 978 | 10,6 | - | - |
| 3-2 АТАО | 717 | 985 | 13,1 | - | - |
| 730 | 982 | 11,9 | -425(-230) | -50(-18) |

Как видно из данных , приведенных в табл.4. применение фтор-ПАВ покрытия и АТАО2 позволяет повысить уровень прочности , особенно значительно не только без снижения пластичности сплава, но и с некоторым ее повышением.

# Выводы

1.Нанесение ФТОР-ПАВ покрытия и применение АТАО уменьшает величину остаточных напряжений в поверхностном слое сплава ВТ23.При этом наиболее значительное снижение остаточных напряжений достигается при использовании АТАО.

2. Применение ФТОР-ПАВ и АТАО технологий наряду с уменьшением остаточных напряжений позволяет увеличить как прочность так и пластичность сплава ВТ23.

3.Применение АТАО как при проведении закалки, так и при отпуске конструкционной стали 40Х позволяет повысить прочность, пластичность и вязкость конструкционной стали, а также снизить уровень остаточных напряжений и создавать сжимающие напряжения в поверхностном слое стали.

Список литературы.

1. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.1 М. Машиностроение, 1974.472с.
2. 1.«Остаточные напряжения в изделиях из нагартованных материалов» к.т.н. В.Н. Шалин, 1963 г.
3. Воробьева Г.А., Ремшев Е.Ю. Анализ влияния режимов аэротермоакустической обработки стали 40Х на параметры акустической эмиссии Металлы №2 2016 с.24-29
4. УсковВ.Н., Воробьева Г.А., Засухин О.Н. , Титов А.В. Ремшев Е.Ю. Способ термической обработки изделий из титанового сплава ВТ23 с низкой релаксационной стойкостью после стандартной термической обработки». 2015г. Патент № 2544322, RU.2015г
5. Influence of Aerothermoacoustic Treatment on the Structure and the Properties of a TS6 Titanium Alloy/E. Yu. Remshev\*, G. A. Danilin, G. A. Vorob’eva, and V. V. Kuznetsov//Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2017, No. 1, pp. 36–41.( DOI: 10.1134/S0036029517010104)Воробьева Г.А., Ремшев Е.Ю.,Данилин Г.А., Беспалов Д.А., Влияние режимов термической и аэротермоакустической обработки на структуру бронзы Бр НХК. Металлург №3.2018. с.
6. Шмитман О.,Влияние оптимальных напряжений на характер превращений при закалке крупных поковок./ О.,Шмитман,Х. Граве,Г.Клаукс.//Черные металлы.1976.№1.С.2-7