

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ТЕХНОЛОГИЙ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНСТИТУТА
ЭЛЕКТРОНИКИ И МАТЕМАТИКИ (ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА)»

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ И
МАТЕМАТИКИ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ТРУДЫ

XVI МЕЖДУНАРОДНОГО СОВЕЩАНИЯ «РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 3-8 июля 2006 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко
Г.Г.

Москва - 2006

УДК 669.
ББК 22.38
Р15
ISBN 5-89671-004-2

Труды XVI Международного совещания «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 3 – 8 июля 2006 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ГНУ «НИИ ПМТ», 2006 г., -642 с.

В рамках совещания проводилась X Международная школа молодых учёных «Радиационная физика твёрдого тела».

Редакционная коллегия:

Д.ф.-м.н. Бондаренко Г.Г. (ответственный редактор), к.ф.-м.н. Костин К.А. (учёный секретарь), д.т.н. Прасицкий В.В.

Отпечатано в типографии ГНУ «НИИ ПМТ».

Уч.-изд.л. 37. Тираж 200 экз.

Заказ 8. 115054, Москва, ул. М.Пионерская, д.12, тел/факс 2355713, 2355105, e-mail: niipmt@mail.ru

УДК 669.
ББК 22.38

© Издательство ГНУ «НИИ ПМТ», 2006

ISBN 5-89671-004-2

© Труды XVI Международного совещания
«Радиационная физика твёрдого тела»

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Паршуков Л. И., Ляшенко Л. В., Смирнов В. Н., Гильмутдинов Ф. З.
ОАО НИТИ «Прогресс» (426006, г.Ижевск, ул. Пушкинская, 268,
parshukov@mail.ru)

Вашенко Т.А. Удмуртский госуниверситет (426034, г.Ижевск,
ул. Университетская, 1, patent@izh.com)

При выполнении некоторых практических работ по электронно-лучевой сварке во время изготовления высоконагруженных узлов энергетических устройств и летательных аппаратов из предварительно термоупрочненных дисперсионно-твердеющих материалов обнаружилась следующая проблема. Мощные тепловые воздействия, связанные с расплавлением металла при формировании сварного шва, вызывали изменение структуры, напряженно-деформированного состояния в сварном шве и в зоне термического влияния, которые приводили к существенному (на 35-40%) снижению прочности сварного соединения по сравнению с основным материалом. Обеспечение конструкционной равнопрочности сварного соединения достигали увеличением толщины областей сварных швов, при этом возрастали весовые параметры узла и изделия в целом. Известные способы [1, 2] дополнительной упрочняющей термической обработки предполагают нагрев всего изделия до высоких температур, что не всегда применимо на практике. В настоящей работе исследованы закономерности влияния локальной упрочняющей электроннолучевой циклической термообработки на механические свойства, состав и структуру мартенситно-сталяей.

Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния материала при локальном тепловом воздействии выполнено в рамках структурно-аналитической теории прочности [3]. Эксперименты проводились на плоских образцах из сталей мартенситно-сталяей класса типа ЧС-92 (X11H10M2T) и ЧС-4 (H18K8M5TЮ). Сварку и локальную циклическую термообработку выполняли на промышленной установке ЭЛСМ-03 «АЭЛТК-75/7.5-4.5». Исследования микроструктуры проводили с помощью металлографического микроскопа типа ММР-4 и растрового электронного микроскопа. Химический состав образцов и сегрегационные явления в сталях

изучены методами рентгеноэлектронной спектроскопии и вторично-ионной масс-спектрометрии на спектрометрах ЭС-2401 и МС-7201М.

Температурные поля в образцах при тепловых воздействиях находили из решения уравнений теплопроводности при двигающемся по поверхности образцов гауссовском источнике тепла с учетом потерь за счет излучения по закону Стефана – Больцмана. Для определения напряженно – деформированного состояния в пластине была создана математическая модель, учитывающая дислокационную пластичность, генерацию вакансий и межузельных атомов за счет температуры и пластической деформации, диффузию посредством движения точечных дефектов и т.д.

Следует отметить, что при электроннолучевой сварке учтенные механизмы массопереноса вносят свой вклад в развитие пластической деформации и при определенных условиях играют доминирующую роль.

Результаты расчетов с помощью приведенной выше системы уравнений позволяют определить значения термических напряжений и деформаций в сварных швах различных материалов. Для этого достаточно располагать сведениями о механических и теплофизических характеристиках материала, а также условиях теплового нагружения.

Далее представлены результаты математических экспериментов для материала, приближенного по своим свойствам к исследуемым сплавам. Из расчетных результатов следует, что при рассматриваемых условиях нагружения наибольшие изменения полной остаточной деформации происходят в зоне воздействия, где действует тепловой поток. Вклад в массоперенос за счет движения дислокаций и вакансионного механизма, которые являются составляющими полной остаточной деформации, существенно зависит от величины теплового потока.

Расчеты показывают, что разогрев шва и околошовной зоны до высоких температур в процессе сварки вызывает их расширение в направлении, перпендикулярном оси шва. Действие со стороны менее нагретой части пластины на высокотемпературную зону вызывает в ней деформации сжатия, переходящие в пластическую деформацию (рис.1).

Деформация, возникающая при полном остывании, препятствует сокращению шва и вызывает при этом растягивающие напряжения в нем.

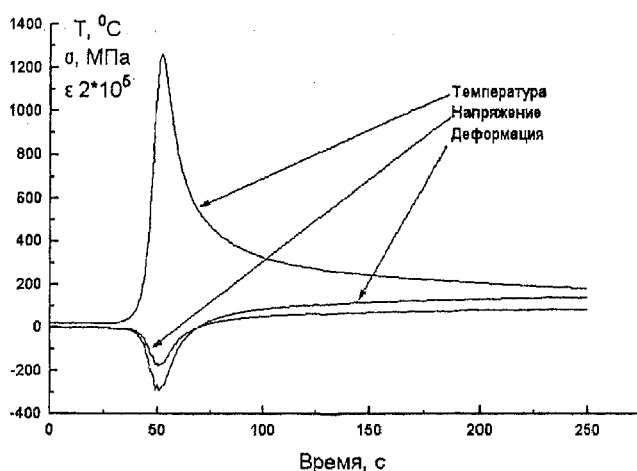


Рис.1. Характер изменения напряженно-деформированного состояния и температуры в материале пластины при движущемся по её поверхности локальном тепловом источнике.

Растягивающие напряжения возникают в сварных швах в первые моменты охлаждения, когда температура сварного шва не достигла начала мартенситного превращения в рассматриваемых сталях. В процессе полного охлаждения, когда температура шва достигла конца интервала мартенситных превращений, в мартенситно-старееющей стали возникают чередующиеся полосы напряжений сжатия в шве и растяжения в зоне термического влияния (рис.2). Ответственными за появление сжимающих напряжений являются мартенситные превращения, при которых происходит существенное уменьшение объема.

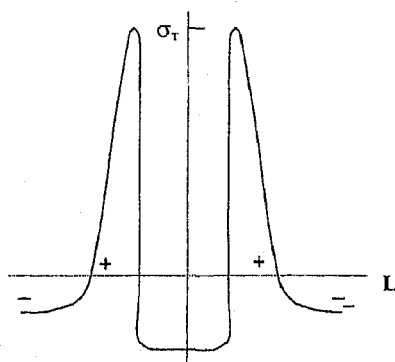


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений поперек сварного шва мартенситно-старееющей стали.

Использование предложенной математической модели позволяет выбрать оптимальные режимы локального теплового воздействия с целью снижения уровня остаточных напряжений и, следовательно, повышения прочности шва. При этом воздействие должно проводиться быстротечно во времени для предотвращения перестаривания окружающего шов основного материала.

Полученные расчетные данные тепловых режимов сварки и термообработки послужили отправной точкой для оптимизации экспериментальных режимов сварки и термоциклического старения сварных швов сталей ЧС-4 и ЧС-92.

Электронно-лучевая сварка приводит к формированию дендритной структуры в шве, изменению микроструктуры в зоне термического влияния, перераспределению компонентов исследуемых сталей, особенно вблизи свободной поверхности и междендритных пространств. Изменения состава и структуры материала, а также остаточные напряжения и высокая плотность дефектов могут существенно влиять на температурный интервал, кинетику и последовательность превращений при упрочняющей термообработке сварного шва, при этом сталь ЧС-92, содержащая значительное количество хрома, может быть наиболее критична к превышению оптимального температурного режима старения в связи с облегченностью процесса образования аустенита. В связи с этим, для определения оптимальных режимов упрочняющей термообработки сварных швов, совместно с результатами расчетов, нами использованы экспериментальные данные по температурной зависимости поверхностных сегрегаций интерметаллидообразующих компонентов, отражающих структурные превращения в объеме стареющих материалов [4].

Полученные результаты для обоих типов сталей показали, что поведение материала шва при термообработке более сложное, многостадийное, по сравнению с основным материалом. Процессы структурно-фазовой перестройки начинаются и достигают своей максимальной активности при температурах, на $30-50^{\circ}$ опережающих старение исходной стали. Наиболее активны компоненты алюминий и титан, и вероятными фазами, определяющими дисперсное упрочнение объема сталей, являются интерметаллидные фазы на основе их соединений с никелем. В стали ЧС-92 уже при $T=490-500^{\circ}$ С возможно начало образования аустенита, что на сегрегационных кривых никеля проявляется в понижении его концентрации.

При этих же температурах возникает вероятность чрезмерного обогащения границ зерен титаном.

Оценен временной интервал достижения максимальных сегрегационных эффектов. В напряженном неравновесном материале шва основные сегрегационные изменения происходят в первые 3 минуты нагрева. Чередование циклов нагрева-охлаждения интенсифицирует превращения в сплаве. Поэтому наиболее подходящим режимом упрочняющей обработки швов является циклический нагрев электронным потоком. При этом возможно повышение прочностных характеристик за счёт снижения внутренних напряжений и повышения дисперсности металла шва при условии минимальности зоны структурных изменений в основном металле. Для оценки теплового режима обработки были выполнены численные расчеты температурных полей по предложенной выше математической модели, в результате которых установлено, что максимальная разница температур на обеих поверхностях пластины (3 мм) при прохождении расфокусированного луча над измеряемой точкой составляет 30° . Термоциклы обеспечивают достижение температуры 470°C на поверхности корня шва и до 500°C на поверхности вершины шва. Время существования данных температур составляет около 50 секунд. Минимальная температура термоцикла составила 200°C . Данный перепад температур в металле вызывает циклическую пластическую деформацию, которая порождает неравновесную концентрацию точечных дефектов. Избыток точечных дефектов существенно ускоряет диффузионные процессы при выделении интерметаллидных фаз. Время пребывания при температуре старения контролируется временем выравнивания избытка концентрации точечных дефектов.

Механические испытания, проведенные на термообработанных образцах швов рассматриваемых сталей, показали увеличение прочности сварного соединения до $153,3 - 156,4 \text{ кг/мм}^2$, что составляет $0,92 - 0,94 \%$ прочности основного металла, при равной пластичности по углу загиба с основным металлом - $(26+28^{\circ})$. Металлографическими исследованиями при этом установлено, что металл обработанного шва имеет микротвердость, измеренную при нагрузке 100 Н, в единицах HV, 446–514, граница сплавления - 446–514, зона термического влияния: зона полной и частичной перекристаллизации и закалки - 433–453, зона достаривания 489–525, основной

предварительно состаренный металл при этом имеет микротвердость в пределах 446 – 474.

Выводы.

Вследствие неравновесного напряженного состояния и отличий в содержании компонентов в сварном шве, процессы образования интерметаллидных фаз происходят более интенсивно, по сравнению с основным материалом.

Температурный интервал оптимальной термообработки на старение смещен в сторону низких температур на 30-50⁰С, по сравнению с основным материалом. С приближением к 500⁰С и выше ожидается интенсивное образование стабильного аустенита, что должно проявляться в ухудшении прочностных свойств.

Для проведения упрочняющей термообработки предпочтителен циклический режим нагрева. Это позволяет существенно сократить общее время термообработки.

При обработке сварных швов в толстых пластинах (≥ 5 мм) достижение необходимой температуры нагрева в корне шва должно исключать перегрев вершины за 480 - 500⁰С. Предлагается шаговый режим термообработки вдоль шва с выдержкой на каждом шаге при температуре обработки в течение 1 мин.

Результаты патентного поиска и обзора публикаций по разработке способов упрочнения дисперсионно-твердеющих и мартенситно-старееющих сплавов показали, что данная проблема по-прежнему актуальна, а сплавы рассмотренного класса в обозримом будущем остаются перспективными для практического применения.

При проведении патентных исследований по теме «Исследование механизмов ускорения полиморфных превращений металлов и сплавов» отобрано 29 патентов, в том числе 6-зарубежных (рис.3).

Результаты анализа патентных источников информации отражены в табл. 1., в которой технические решения разделены на 4 группы: 1.термообработка; 2. термообработка изделий и конструкций из мартенситно-старееющих и дисперсионно- твердеющих металлов и сплавов; 3. сварка, пайка изделий из мартенситно-старееющих и дисперсионно-твердеющих металлов и сплавов; 4. химический состав мартенситно-старееющих и дисперсионно-твердеющих металлов и сплавов

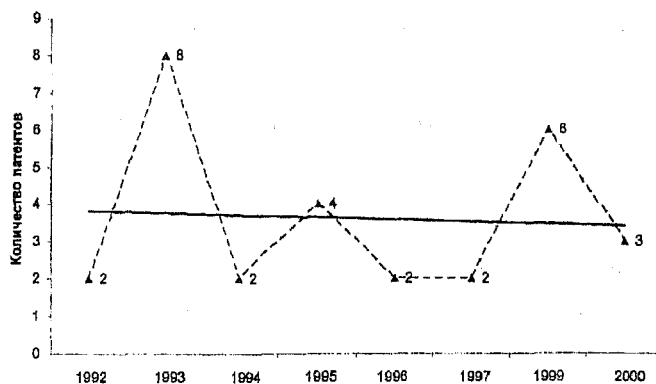


Рис.3. Динамика патентования по годам

Таблица 1

Наименование предприятий и фирм	1 гр	2 гр	3 гр	4 гр
Московский институт стали и сплавов	4			3
Центральный НИИТочмаш				1
Курский машиностроительный институт		1		
Уральский электрохимкомбинат	1			
Семенов В.Н., Княжников Г.И., Недашковский К.И., Каменский С.Д.			2	
Семенов В.Н., Недашковский К.И.			2	
Опытное конструкторское бюро "Факел", Семенов В.Н.	1	1		
НПО энергетического машиностроения им. В.П.Глушко (ОАО "Энергомаш" с 2000г.); Семенов В.Н., Недашковский К.И.		4		
Имфи Южин Пресизьон (FR), Реаль Жан-Пьер	1			2
ОАО "НПФ по внедрению научных и инженерных инноваций"		2		
Семенов В.Н., Недашковский К.И.,		1		
ОАО "НПО"			2	
Honda Giken Kogyo Kabushiki Kaisha (Tokyo, JP)	1			

Результаты проведенных патентных исследований были использованы при регистрации патента № 2002106936 «Способ термической обработки сварных

соединений из мартенситно-стареющих сталей» на имя ОАО «Научно-исследовательский технологический институт «Прогресс».

Литература:

1. Способ термической обработки конструкций. № 97105202 А, С21D 6/00, 1999.
2. Способ термической обработки сварных соединений из мартенситно-стареющих сталей. № 2103382 С1, С21D 6/00, 1998.
3. Лихачев В.А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности. Л.:Наука, 1992.
4. Гильмутдинов Ф.З. Канунникова О.М. Паршуков Л.И. Поверхностные сегрегации и структурно-фазовые превращения в мартенситно-стареющих сталях при термических воздействиях// Материаловедение, 2003 №11, С. 26-29.