

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ БЕЙ- НИТНОГО КЛАССА

М.Н. Сейдуров, Е.А. Иванайский, А.А. Иванайский

*В данной работе изложена методика оценки и прогнозирования структуры и свойств высокотемпературных участков зоны термического влияния сварных соединений из высокопрочных сталей бейнитного класса. Показано, что на образование холодных трещин решающее влияние оказывают особенности протекания промежуточного превращения, при котором в условиях термомодеформационного воздействия на металл происходит зарождение очагов замедленного разрушения.*

*Ключевые слова: высокопрочные стали, сварные соединения.*

В настоящее время значительно возрос объем применения высокопрочных сталей бейнитного класса при создании особо ответственных сварных конструкций и узлов новой техники. Основной проблемой при этом является необходимость обеспечения высокой степени соответствия физико-механических и химических свойств условиям и требованиям эксплуатации, а также стойкости против образования локальных разрушений – холодных трещин.

Эксплуатационные свойства сварных конструкций и технологическая прочность металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) определяются термомодеформационными процессами, фазовыми и структурными превращениями при сварке. В связи с этим для разработки оптимальной технологии сварки высокопрочных сталей целесообразно проведение мероприятий по оценке и прогнозированию структуры и свойств сварных соединений с учетом реакции металла ЗТВ на термомодеформационные циклы сварки (ТДЦС), что позволит до сварки определять условия получения качественных и работоспособных швов с заданной структурой и свойствами.

Цель работы – разработать методику оценки и прогнозирования структуры и свойств высокотемпературных участков ЗТВ высокопрочных сталей бейнитного класса, подверженных воздействию ТДЦС.

Исследованию подвергались высокопрочные стали бейнитного класса 20Х2НАч, 24Х2НАч и 28Х2НАч промышленных плавок с содержанием углерода до 0,3 % и суммарным содержанием легирующих элементов до 4,0 %. Сравнительные эксперименты проводили на стали 30ХНЗА.

Стойкость металла сварного шва к воз-

никновению холодных трещин оценивали по показателям ударной вязкости и сопротивлению хрупкому разрушению, так как эти параметры весьма чувствительны к изменениям структуры высокотемпературных участков ЗТВ и условий ее формирования в условиях развития локальных пластических деформаций.

Экспериментальные исследования проводили с регистрацией изменений температуры и параметров напряженно-деформированного состояния во времени. Совместно применяли как физическое, так и математическое моделирование с использованием современной компьютерной техники и программных продуктов.

Исследования продуктов распада аустенита, формирующихся в высокотемпературных участках ЗТВ при сварке высокопрочных сталей бейнитного класса выполняли на основе термического метода анализа, основанного на регистрации эффекта выделения теплоты, сопровождающего фазовые превращения. В работе использовались как сварные образцы, выполненные автоматической сваркой под флюсом, так и образцы-имитаторы, в которых воспроизводился термический и деформационный цикл сварки с помощью экспериментальной установки (рисунок 1).

Практическое моделирование по методике «in situ» [1] позволило исследовать превращение аустенита непосредственно в заданной точке сварного соединения и образца-имитатора. Получение экспериментальной информации осуществлялось с помощью комплекса сбора и обработки данных, принципиальная блок-схема которого приведена в работе [2]. В качестве модуля сбора данных применялся измеритель-

регулятор «ОВЕН ТРМ 202 v2.025», их обработка и регистрация производилась прикладной программой «MasterSCADA». Структуру и фазовый состав для построения диаграмм анизотермического распада аустенита (АРА) и структурных диаграмм изучали с помощью оптической и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа. Для компьютерного моделирования процессов автоматической сварки под флюсом с заданным тепловложением авторами был создан программный продукт «Среда моделирования автоматической сварки (AWS)» [3].

По мере поступления данных от модуля сбора строился экспериментальный график термо- (и/или деформационного) цикла, который сопоставлялся с результатами компьютерного моделирования по входным параметрам [4], производился подбор режимов сварки и предварительная оценка свойств сварного шва (рисунок 2). Прогнозирование структуры и свойств металла ЗТВ с учетом влияния погонной энергии и режимов сварки выполняли на основе анализа экспериментально полученных АРА и структурных диаграмм [5], определения химического состава и механических свойств контрольных сварных соединений.

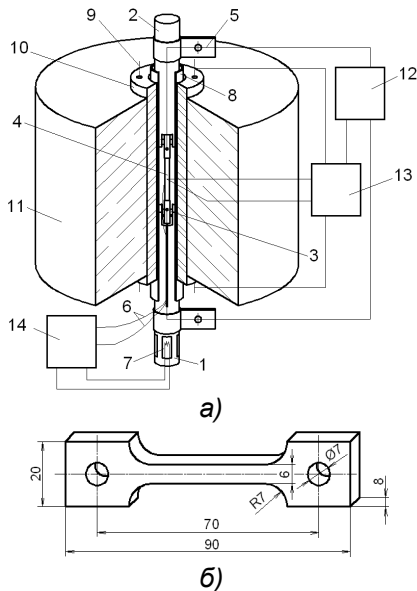
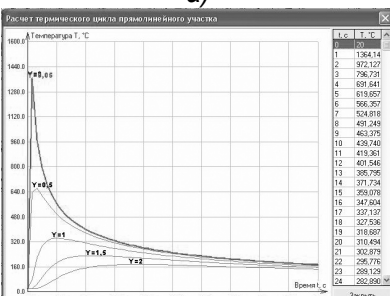
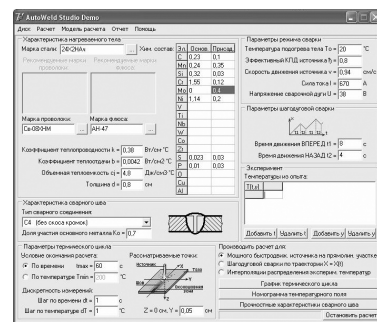


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки (а): 1, 2 – неподвижный и подвижный захваты; 3 – палец; 4 – образец-имитатор (б); 5 – токоподводы; 6 – блок термопар; 7 – блок тензодатчиков сопротивления; 8 – жаропрочный тигель; 9 – спираль накаливания; 10 – тигель электропечи; 11 – корпус электропечи; 12 – источник

питания; 13 – блок управления; 14 – комплекс сбора и обработки данных

Исследования характера развития напряжений растяжения в жесткозакрепленном образце-имитаторе в процессе его охлаждения (рисунок 3) позволили анализировать механизм зарождения и развития холодных трещин с учетом ТДЦС, а также оценивать чувствительность сталей к образованию холодных трещин.

Установлено, что на образование холодных трещин в высокопрочных сталях бейнитного класса основное влияние оказывают особенности протекания промежуточного превращения, при котором в условиях ТДЦС происходит зарождение или возникают предпосылки к зарождению потенциальных очагов замедленного разрушения, связанных с интенсивной пластической деформацией при фазовом разупрочнении.



Механические свойства сварного шва

Концентрация легирующих элементов в металле шва (в %)

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Nb	W	Co	Zr	S	P	O	Cu	Al
0,1910	0,2730	0,2230	1,1210	0,12	0,8690	0	0	0	0	0	0	0,0250	0,0160	0	0	0

Время охлаждения металла шва от 850 до 500°С: 5,325 с.

Оценка ударной вязкости металла шва  
 Максимальная ударная вязкость KCVmax = 976201,67 Дж/м²  
 Критическая температура ударной вязкости Tk = 16,28 °С  
 Ширина области переходов: температура Tg = 31,66 °С

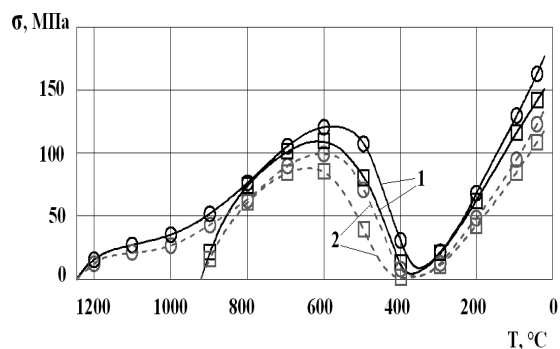
Оценка пластичности металла шва  
 Относительное пропорциональное удлинение dp = 7,50 %  
 Относительное удлинение d5 = 12,43 %  
 Относительное сужение φ = 30,02 %

Оценка доли волокнистой составляющей в изломе металла шва  
 Критическая температура хрупкости Tk = 6,46 °С  
 Температурный коэффициент хрупкости Kch = 0,60 %/°С

Рисунок 2 – Интерфейс программы «AWS» (а) и результаты компьютерного моделирования (б)

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ БЕЙНИТНОГО КЛАССА

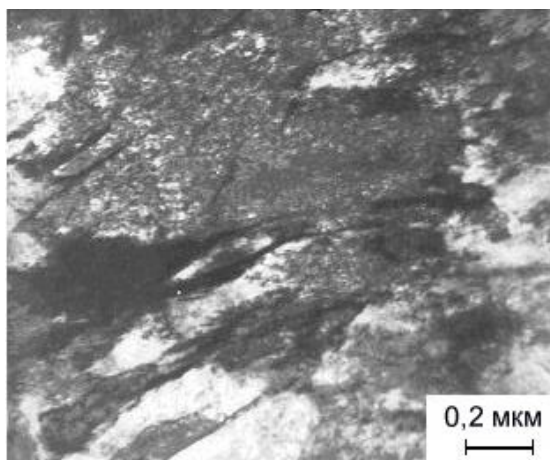
При высоких скоростях развития пластических деформаций (рисунок 3, кривые 1) происходит формирование игольчатых бейнитно-мартенситных структур с пластинчатой карбидной фазой типа  $Me_3C$ . Высокие скорости релаксации микронапряжений увеличивают уровень внутренних напряжений, поскольку микропластическая деформация аустенита затруднена. Интенсивное развитие микропластических деформаций происходит по границам аустенитных зерен. Это приводит к нарушению строения границ и, как следствие, к возникновению очагов замедленного разрушения (рисунок 4,а).



**Рисунок 3** – Кривые развития внутренних напряжений в 3ТВ стали 24Х2НА4 при формировании промежуточных структур: 1 – бейнитные зернистой морфологии; 2 – бейнито-мартенситные игольчатой морфологии

При более медленных скоростях развития пластических деформаций (рисунок 3, кривые 2), основной объем фазовых превращений происходит в высокотемпературном интервале промежуточной области и сопровождается непрерывным нарастанием пластической деформации, вызывая активизацию распада аустенита. Формируются бейнитные структуры зернистой морфологии. Благодаря наличию дефектов кристаллического строения, возникающих в переохлажденном аустените под действием ТДДС, вместе с  $\alpha$ -фазой выделяется карбид типа  $Me_{23}C_6$  глобулярной формы диаметром от 10 – 20 до 200 нм [6]. Микропластическая деформация развивается как по границам зерен аустенита (место расположения крупных карбидов), так и внутри их (место расположения мелких карбидов), что значительно облегчает процесс аккомодации зерен при общей пластической деформации, снижает уровень внутренних напряжений при медленных скоростях релаксации и способствует повышению сопротивления хруп-

кому разрушению формирующейся структуры (рисунок 4,б).



а)



б)

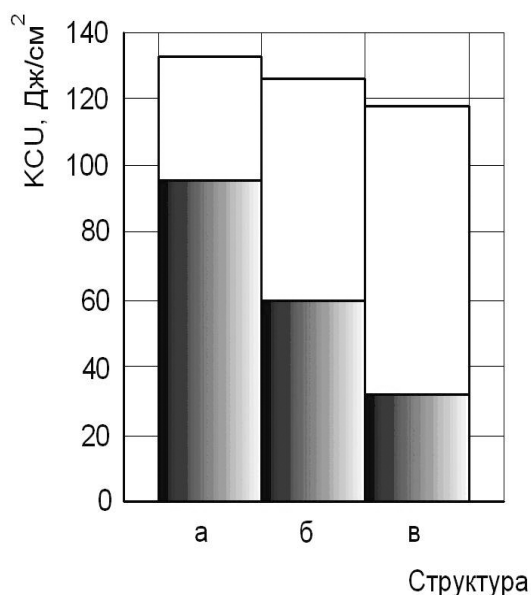
**Рисунок 4** – Тонкая структура в локальных участках: а) пластины бейнитного феррита; б) фрагментированный феррит и мезоферрит

Определение хладостойкости сварных соединений с промежуточной структурой различной морфологии в высокотемпературных участках 3ТВ было проведено по линии сплавления. Испытания на ударную вязкость проводились при двух температурах: +20 и –60°С (рисунок 5).

Установлено, что промежуточная структура зернистой морфологии является наиболее предпочтительной по сравнению с другими промежуточными структурами игольчатого строения (верхний и нижний бейнит) и мартенситом. Это объясняется особенностью ее строения – наличием мезоферрита и карбидов глобулярной формы в матрице бейнитной  $\alpha$ -фазы, что благоприятно влияет на деформационную способность зернистого бейнита.

Влияние химического состава и струк-

туры металла на сопротивляемость ЗТВ образованию холодных трещин объясняется тем, что физические свойства металла шва и ход структурных превращений в нем существенно сказываются на развитии упруго-пластических деформаций в ЗТВ, а, следовательно, и на кинетике превращения аустенита в бейнитной и мартенситной областях. В результате изменяются структура и свойства ЗТВ, в частности ее стойкость к образованию холодных трещин.



*Рисунок 5 – Влияние структуры сварного соединения на ударную вязкость по линии сплавления: а) смесь мезоферрита и зернистого бейнита; б) смесь зернистого, верхнего и нижнего бейнита; в) смесь нижнего бейнита и мартенсита. Температура испытаний, °C: +20 – белая область; –60 – серая область*

### Выводы

1. Разработанная методика оценки и прогнозирования структуры и свойств высокотемпературных участков ЗТВ сварных соединений высокопрочных сталей бейнитного класса позволила установить, что структура мезоферрита и зернистого бейнита является

наиболее предпочтительной с точки зрения сопротивления хрупкому разрушению.

2. Ведущую роль в предотвращении очагов замедленного разрушения в процессе  $\gamma \rightarrow \alpha$  - превращения в условиях развития локальных пластических деформаций играют карбиды глобулярной формы диаметром около 10 – 20 нм, расположенные преимущественно на дислокациях внутри всех структурных составляющих  $\alpha$ -фазы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория сварочных процессов / под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
2. Исследование процессов сварки и наплавки с использованием современной методики сбора и обработки экспериментальных данных / М.В. Радченко, Д.П. Чепрасов, Ю.О. Шевцов, А.А. Иванайский, А.П. Борисов, М.Н. Сейдулов, П.С. Черемисин // Обработка металлов. – 2008. – № 1. – С. 7-10.
3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007612876. Среда моделирования автоматической сварки (AWS) / Е.А. Иванайский, А.А. Иванайский, В.В. Иванайский, М.Н. Сейдулов.
4. Иванайский, А.А. Разработка и внедрение инженерного программного комплекса по оценке и прогнозированию механических свойств сварных соединений на основе сбора и обработки экспериментальной информации и компьютерного моделирования / А.А. Иванайский, М.Н. Сейдулов // Ползуновский альманах. – 2008. – № 2. – С. 112-114.
5. Чепрасов, Д.П. Влияние термомодеформационных циклов на формирование зернистого бейнита в околошовной зоне при дуговой сварке стали 24Х2Н4ч / Д.П. Чепрасов, М.Н. Сейдулов, А.А. Иванайский // Ползуновский вестник. – 2008. – № 4. – с. 89-94.
6. Сейдулов, М.Н. Роль типа и размера карбидной фазы в образовании очагов замедленного разрушения в условиях развития локальных пластических деформаций / М.Н. Сейдулов, А.А. Иванайский // Высокотемпературный синтез новых перспективных наноматериалов / Под. ред. Евстигнеев В.В., Еськов А.В. Барнаул. – 2008. – С. 26-29.

*Сейдулов М.Н., ст. преподаватель, аспирант кафедры «МСПБ» АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Иванайский Е.А., к.т.н., доц. АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Иванайский А.А., к.т.н., ст. преподаватель АлтГТУ им. И.И. Ползунова*