

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ИМ. З.И. НЕКРАСОВА

На правах рукописи

ОСАДЧЕНКО Александр Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И
ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИ УПРОЧНЕННОГО ПРОКАТА

05.16.01 - Металловедение и термическая
обработка металлов

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск - 1975



AB 32.71

Робота виконана в Інституті чорної металургії
ім. В. І. Некрасова НАН України.

Научні керівники :

доктор технічних наук, професор І. Г. Узлов

ведучий научний співробітник Інститута
чорної металургії кандидат техні-
чних наук В. В. Калмаков

Офіційні опоненти:

Академик: МІА, доктор технічних
наук, професор В. І. Більмаков

Кандидат технічних наук, професор В. К. Флоров

Ведуче підприємство:

Макеєвський металургічний комбінат

Захист состоится "15" сентября 1995 г. в 14 часов
на засіданні спеціалізованого комітету К. 03.09.01 в
Інституті чорної металургії НАН України по адресу:
320050, г. Дніпропетровськ, пл. Акад. Стародубова, 1.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інститута
чорної металургії.

Анотераферат розослан "1" августа 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
канд. техн. наук

 Г. В. Кивченко

АВ - 32.713

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Огромный рост стоимости металла и энергоносителей выдвинули задачу создания для строительной индустрии Украины и, в частности, для производства обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций свариваемой арматурной стали с прочностью сварных соединений не менее 750...800 Н/мм². Это позволяет в сравнении с горячекатаной сталью невысокой прочности (класса А-III) экономить до 20 % металла при изготовлении длинномерных (12 м и более) предварительно напряженных железобетонных конструкций. При этом предоставляется возможность эффективно использовать образующиеся на металлургических предприятиях немерные длины и коротыши стержневой арматуры в технологическом потоке безотходного производства изделий на заводах КБИ. Свариваемая арматурная сталь этого класса прочности в Украине не производится, а выпускаемая металлургической промышленностью термосточенная арматура классов Ат-IV...Ат-VI из обычных сталей марок 20ГС, 10ГС2 и др. не обеспечивает прочности сварных соединений на таком уровне из-за относительно большого ее разупрочнения при контактной стыковой сварке.

Решение этой задачи заключается в изучении факторов и условий, определяющих закономерности разупрочнения высокопрочного металла при сварке, в исследовании влияния химического состава, структурного состояния, технологии производства на весь комплекс потребительских и эксплуатационных свойств термосточенного арматурного проката с целью поиска технических предложений, которые бы позволили повысить надежность и несущую способность сварных соединений высокопрочной стали при изготовлении обычных и предварительно напряженных длинномерных железобетонных конструкций.

Цель работы. Исследование процессов структурообразования и формирования свойств сварных соединений термомеханически упрочненного проката для научно обоснованного выбора технических решений, позволяющих повысить эксплуатационную свариваемость арматурного проката повышенной и высокой прочности.

Научная новизна. Впервые на арматурных сталях 4КП, 20ГС, 10ХГС2 установлена и обоснована принципиальная экспоненциальная зависимость прочности сварных соединений от ис-

ходной прочности металла с максимумом, расположенным внутри диапазона всех возможных для соответствующей стали уровней прочности, включая закаленное состояние без отпуска.

Показано и объяснено, что в условиях контактной стыковой сварки легирование низкоуглеродистой марганцовистой стали кремнием в количестве 1,5...2 % существенно увеличивает прочность сварных соединений изготовленного из нее термоупрочненного арматурного проката.

Обнаружено, что при контактной стыковой сварке методом непрерывного оплавления заметного перераспределения легирующих элементов (марганца, кремния, хрома) в линии сплавления и прилегающих к ней областях в сравнении с основным металлом не наблюдается.

Установлено, что при сварке резко отличающихся по химическому составу материалов (стали 4КП и IOXIC2) концентрация марганца, кремния, хрома по линии сплавления изменяется скачкообразно.

Установлено, что при умеренно жестких режимах сварки разрушение сварного соединения термоупрочненной арматуры при растяжении происходит не по одной структурной области ЗТВ, а по различным ее структурным участкам. Поэтому несущая способность сварного соединения определяется вкладом в работу разрушения как объемной доли структур, возникающих в результате перекристаллизации под действием тепла сварочного цикла (что понижает прочность), так и объема металла ЗТВ с исходными структурами отпуска, сдерживающими разупрочнение при сварке.

Подтверждено образование "мягкой" прослойки (провала микротвердости) в ЗТВ сварного соединения из термоупрочненной арматуры после локальной упрочняющей термообработки сварного стыка в технологическом процессе сварки. Вскрыт механизм ее образования и идентифицирована ее металлографическая природа.

Показано, что структура "мягкой" прослойки состоит из полигонального феррита и отпущенного мартенсита (бейнита).

Практическая ценность. Получены систематические данные о влиянии химического состава, технологии сварки, углеродного эквивалента, исходной прочности, локальной термообработки сварных стыков в технологическом цикле контактной стыковой

сварки на структурное состояние и высокую способность сварных соединений термоупрочненной арматуры различной структуры и прочности. В целях снижения разупрочнения разработаны, обоснованы и рекомендованы к применению умеренно "жесткие" режимы контактной стыковой сварки термоупрочненной арматуры, обеспечивающие снижение тепловложений и сокращение ЗТВ сварных соединений.

Сформулированы условия достижения заданной величины эксплуатационной свариваемости термоупрочненного арматурного проката, предусматривающие при умеренно жестких режимах сварки одновременное соблюдение значений углеродного эквивалента $C_{\text{э}}$ и уровня исходной прочности сваряемого металла. Разработана и опробована в промышленных условиях комбината "Криворожсталь" новая технология производства термомеханически упрочненной свариваемой бунтовой и стержневой арматуры диаметром 8...18 мм из стали марки 4КП двух классов прочности:

- Ат 400С (Ат-ПС) при $C_{\text{э}}$ не менее 0,241
- Ат 449С (Ат-ПС) при $C_{\text{э}}$ не менее 0,325

Производство такой продукции позволяет снизить расход марганца и кремния соответственно на 15 и 32 % в сравнении с аналогичным прокатом из традиционной стали марки Ст5ПС этого же класса прочности.

Разработаны и внедрены в производство технические условия ТУ 14-15-ЗП-93 "Прокат арматурный термомеханически упрочненный марки Ст4КП".

Создана и внедрена в промышленное производство на комбинате "Криворожсталь" новая свариваемая термомеханически упрочненная арматурная сталь класса Ат-ПС марки 27ПС. Сталь защищена авторским свидетельством № 1386673. Арматурная сталь марки 27ПС внесена в ГОСТ 10884-94 "Сталь арматурная термомеханически упрочненная" и технические условия ТУ 14-2-1049-92 "Прокат арматурный свариваемый". В 1994 г. из этой стали изготовлено более 6 тыс. тонн свариваемой термомеханически упрочненной арматуры класса Ат-ПС. Подтвержденный экономический эффект от ее применения в строительном производстве составляет 2,97 млн. руб./т (в ценах 1994 года).

На защиту выносятся следующие положения:

- Закономерности распределения химических элементов в зо-

не сплавления и прилегающих участках сварных соединений, выполненных контактной стыковой сваркой методом непрерывного оплавления.

- Результаты исследования влияния углерода, марганца, кремния, хрома на процессы разупрочнения в сварных соединениях термомеханически упрочненной арматуры.

- Зависимости конечной прочности сварных соединений от исходного структурного состояния и прочности арматурных сталей различного химического состава.

- Особенности фазовых и структурных превращений при локальной термообработке сварных соединений в самом технологическом процессе контактной стыковой сварки термоупрочненной арматуры и металлографическая природа "мягких" прослоек, возникающих в сварных соединениях при такой обработке.

- Химический состав и технологию термомеханического упрочнения новой свариваемой арматурной стали класса Ат-IVС марки 27ГС.

Апробация работ. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной научно-технической конференции молодых металлургов-исследователей; "Проблемы повышения технического уровня производства черных металлов и сплавов" (г. Донецк, 1987 г.); Всесоюзной научно-технической конференции "Основные направления повышения качества и служебных свойств металлопродукции из черных металлов и ее рационального использования в народном хозяйстве" (г. Москва, 1987 г.); Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение свойств и эксплуатационной надежности термически обработанного проката" (г. Днепропетровск, 1988 г.); Научно-техническом семинаре "Методы повышения конструктивной прочности металлических материалов" (г. Москва, 1988 г.); Международном семинаре "Металлургические требования производителей и потребителей к свариваемости стальной продукции" (г. Киев, 1991 г.).

Публикация материалов. По материалам диссертации опубликовано 9 статей, получено 2 авторских свидетельства.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, выводов и приложений, изложена на 144 листах машинописного текста, включает 35 иллюстраций, 16 таблиц и 97 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложены основные вопросы, составляющие суть диссертационной работы, и выносимые на защиту основные ее положения.

В литературном обзоре показана сложность и многоплановость вопроса свариваемости термического упрочнения проката черных металлов, освещены данные свариваемости термоупрочненных арматурных сталей массового производства. Определены факторы, определяющие процессы разупрочнения сварных соединений при контактной стыковой сварке металла в метастабильном (упрочненном) состоянии. Сформулированы цели и задачи исследования.

Материал и методика исследования

Материалом исследования служила термомеханически упрочненная арматурная сталь промышленного производства различного химического состава и различных классов прочности диаметром 14...18 мм. Химический состав и механические свойства исследуемых арматурных сталей приведены в табл. 1. Выплавку, прокатку и термомеханическое упрочнение экспериментальной арматуры осуществляли на комбинате "Криворожсталь". Арматурные стержни сваривали контактной стыковой сваркой на стационарных сварочных машинах МСМУ-150 и МС 2008. Механические свойства основного металла и сварных соединений определяли путем испытаний на статическое растяжение на разрывных машинах ЦДМУ-30, РР-100 при скорости нагружения 0,5 мм/мин. Оценку металлургической и эксплуатационной свариваемости арматуры проводили по результатам испытаний не менее 25 сварных стыков на каждый вариант химического состава и уровня исходной прочности. Изменение твердости в зоне термического влияния сварного соединения определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 200 г в направлении от основного металла к линии сплавления на продольных микрошлифах, протравленных водным раствором хлорного железа в азотной кислоте.

Исследование микроструктуры сварных соединений термомеханически упрочненных сталей проводили на световом металлографическом микроскопе "Neophot -2" при увеличении $\times 200$; $\times 500$; $\times 1000$. Тонкую структуру зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений изучали с помощью угольных реплик с самооттенеением и тонких фольг на просвет на электронных микроскопах Е -2 и УЭМБ-100К. Фольги готовили методом пинцета, используя стан-

Таблица I

Химический состав и механические свойства исследуемых термомеханически упрочненных арматурных сталей

Марка стали	Химический состав (в % по массе)						Механические свойства		
	C	Mn	Si	S	P	Cv	$\sigma_{0,2}$ Н/мм ²	σ_B Н/мм ²	δ_5 %
4КЛ	0,24	0,40	0,02	0,022	0,012	-	500	640	24,0
4КЛ	0,18	0,42	0,07	0,026	0,016	-	510	680	22,0
08Г2С	0,06	1,71	1,0	0,021	0,026	-	840	1050	13,2
Ст5ЛЕ	0,32	0,68	0,26	0,027	0,016	-	525	646	24,0
10ГС2	0,09	1,12	1,69	0,035	0,030	-	900	960	14,3
10ГС2	0,11	1,15	1,75	0,037	0,032	-	920	980	13,6
10ГС2	0,13	1,16	1,67	0,036	0,035	-	940	1000	13,2
10ХГС2	0,11	0,95	1,60	0,028	0,030	0,55	920	1100	11,2
10ХГС2	0,14	1,25	1,61	0,037	0,029	0,43	980	1120	11,5
20ГС	0,16	0,15	0,12	0,036	0,015	-	900	1150	10,6
20ГС	0,19	1,20	1,22	0,038	0,015	-	890	1150	10,2
20ГС	0,22	1,20	1,26	0,032	0,017	-	890	1190	10,0
27ГС	0,24	1,17	1,31	0,032	0,024	-	850	980	15,5
27ГС	0,29	1,20	1,28	0,030	0,026	-	820	960	14,6

дартный реактив Морриса. Оценку химической неоднородности сварных соединений проводили на микровозде МС-46 (фирмы КАМЕКА, Франция).

Исследование изменения структуры и свойств при сварке термомеханически упрочненного арматурного проката массового производства

Приведены результаты анализа фазовых и структурных превращений, происходящих в ЗТВ сварных соединений термоупрочненной арматуры из сталей 08Г2С, 20ГС, 10ГС2, 10ХГС2 при контактной стыковой сварке.

Показано, что сварное соединение из термомеханически упрочненной арматуры представляет собой сложную систему различных структурных состояний, начиная от возникновения малопрочной феррито-перлитной структуры и заканчивая высокопрочными мартенсито-бейнитными структурами исходного термомеханически упрочненного состояния. Отсюда вытекает, что степень разупрочнения при сварке и фактическая несущая способность сварных соединений такой стали должна зависеть от объемной доли различных структурных состояний в ЗТВ и определяться в условиях обычных скоростей охлаждения сварного соединения:

- технологией контактной стыковой сварки;
- химическим составом стали и исходным структурным состоянием свариваемого металла.

Приведены результаты статистической обработки значений прочности сварных соединений термомеханически упрочненной арматуры массового производства.

Установлено, что термоупрочненная арматура классов Ат-V, Ат-VI из сталей 20ГС и 08Г2С при контактной стыковой сварке разупрочняется до класса прочности А-III. С повышением содержания углерода в пределах марочного состава эксплуатационная свариваемость термоупрочненной стали 20ГС возрастает и может достигнуть значений, отвечающих требованиям класса Ат-IYC ($\sigma_B^{ст}$ не менее 750 Н/мм²). Подтверждено, что для обеспечения свариваемости высокопрочной стали по классу Ат-IYC необходимо иметь величину углеродного эквивалента ($C_3 = C + 1/6 Mn + 1/4 Si$) не менее 0,58.

Установлено, что повышение в низкоуглеродистой мартенситовой стали содержания кремния до ~ 2 % существенно увеличивает ее эксплуатационную свариваемость в термоупрочненном со-

тоянии.

Исследовано распределение химических элементов в сварных соединениях при контактной стыковой сварке термоупрочненных арматурных сталей. Обнаружено, что заметного перераспределения легирующих элементов в линии сплавления и прилегающих областях не наблюдается. При сварке резко различных материалов (стали ЧКП и ЮХГС2) концентрация марганца, кремния и хрома по линии сплавления изменяется скачкообразно (рис. 1).

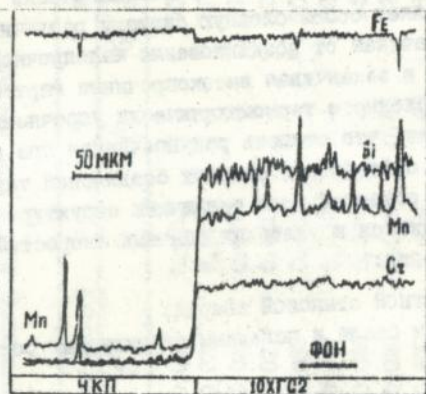


Рис. 1. Распределение химических элементов по линии сплавления сварных соединений резко отличающихся материалов.

Исследование факторов, определяющих эксплуатационную свариваемость и несущую способность термоупрочненного арматурного проката со сварными соединениями

Режим контактной стыковой сварки оказывает значительное влияние на степень разупрочнения высокопрочного арматурного проката. В целях снижения разупрочнения следует выбирать умеренно "жесткий" режим сварки, обеспечивающий понижение тепловых воздействий и сокращение размеров ЗТВ в сварных соединениях.

Подтверждено, что основными параметрами режима контактной

стыковой сварки, определяющими механические свойства сварных соединений упрочненной арматуры, являются: установочная длина, степень мощности сварочного трансформатора, величина общей осадки и осадки под током. Поиск оптимальных значений основных технологических параметров контактной стыковой сварки проводился с использованием метода математического планирования эксперимента. На основании полученных результатов из серии опытов был выбран оптимальный режим сварки по каждому диаметру свариваемых стержней.

Показано, что в условиях умеренно "жестких" режимов сварки прочность сварных соединений зависит от двух факторов: исходной прочности металла и его углеродного эквивалента (C_0). С их увеличением эксплуатационная свариваемость возрастает. Установлено также, что зависимость прочности сварного соединения (σ_s^{cb}) от прочности исходного металла ($\sigma_s^{он}$) во всем диапазоне возможных уровней прочности данного материала, включая закаленное состояние без отпуска, описывается экспоненциальной кривой с максимумом, т.е. для каждого материала имеется некоторая граничная величина исходной прочности, превышение которой приводит уже к ухудшению свариваемости - снижению несущей способности сварного соединения.

Такая экспоненциальная зависимость обусловлена, по-видимому, сложным взаимодействием при контактной стыковой сварке исходного структурного состояния, пластичности и адгезии свариваемого термоупрочненного металла.

Исследовано структурное состояние и механические свойства сварных соединений высокопрочной арматуры после их локальной термообработки со сварочного нагрева (прерванная закалка в воде, обдувка сжатым воздухом, самоотпуск или отпуск). Такая упрочняющая обработка коренным образом повышает несущую способность сварных соединений в сравнении с традиционной технологией сварки: их прочность практически приближается или даже оказывается идентичной прочности свариваемого арматурного проката, т.е. снижения агрегатной прочности сварного соединения в сравнении с основным металлом не происходит.

В этом случае по всему поперечному сечению сварного соединения возникает структура отпускаемого низкоуглеродистого мартенсита и (или) бейнита, близкая к структуре основного металла. В участках ЗТВ, претерпевших при сварке нагрев в области $\alpha + f$, после локальной термообработки возникает выделения

изоморфного феррита в мартенсито-бейнитной матрице, которые несколько снижают твердость металла (так называемая "мягкая" прослойка). Однако существенного влияния на снижение агрегатной прочности сварного соединения такая прослойка не оказывает.

Термомеханически упрочненная свариваемая арматура классов Ат-ПС и Ат-ШС из стали марки 4КП

Исследована и показана возможность производства, например, на комбинате "Криворожсталь" свариваемой высокопластичной арматуры классов прочности Ат-ПС и Ат-ШС с пределом текучести 400 и 440 Н/мм² соответственно из простой по химическому составу стали типа 4КП для дополнительного снижения раскислителей при производстве стали, расходного коэффициента металла при прокатке слитков и снижения вероятности переупрочнения при термической обработке такого арматурного проката в потоке станов в сравнение со сталью марки Ст5ПС. Исследованию подвергали натурные образцы термомеханически упрочненной арматуры из сталей марок 4КП и Ст5ПС (сравнительная) с нижним и верхним марочными пределами по содержанию углерода. Вследствие значительно более низкого среднего марочного содержания углерода в стали 4КП (0,22 %) по сравнению со Ст5ПС (0,32 %) при упрочнении в потоке стана на класс Ат-ШС вероятность возникновения излишне высокой прочности в арматуре из стали 4КП существенно снижается: временное сопротивление не превышает 700 Н/мм², что соответствует прочности горячекатаной стали класса А-Ш марок 35ГС и 25Г2С.

Установлено, что из-за более низкого содержания углерода термомеханически упрочненная арматура из стали 4КП несколько уступает по эксплуатационной свариваемости аналогично упрочненной арматуре из Ст5ПС, тем не менее прочность ее сварных соединений во всем диапазоне изменения содержания углерода в пределах марки 4КП полностью отвечает требованиям класса А-ПС ($\sigma_{\text{в}}$ не менее 500 Н/мм²), а при содержании углерода 0,26 % и более — класса Ат-ШС ($\sigma_{\text{в}}$ не менее 550 Н/мм²). Максимальное разупрочнение (17 %) наблюдается в такой арматуре при содержании углерода на нижнем пределе (0,18 % С). С ростом содержания этого элемента в пределах марки разупрочнение снижается на 4-7 %.

Установлена четкая взаимосвязь минимальных значений прочности сварных соединений термоупрочненного металла по классам Ат400С и Ат 440С (Ат-ПС и Ат-ШС) и величии углеродного эквивалента (С_э). Для обеспечения свариваемости такого проката по класс-

су прочности Ат 400С (Ат-ПС) углеродный эквивалент должен быть не менее 0,24I, а по классу Ат 440С (Ат-ШС) — не менее 0,325. Отметим, что при изготовлении термомеханически упрочненной арматуры класса Ат-ШС из стали 4КП, помимо соблюдения величины углеродного эквивалента не менее 0,325, необходимо иметь уровень исходной прочности металла в состоянии поставки не ниже 650 Н/мм^2 .

Показана высокая экономическая эффективность производства термомеханически упрочненной свариваемой арматуры из стали 4КП классов Ат-ПС и Ат-ШС вместо равнопрочных свариваемых горячекатаной и термоупрочненной с прокатного нагрева арматуры из сталей марок Ст5ПС и Ст5СП.

Новая свариваемая термомеханически упрочненная арматурная сталь класса Ат-ЛС марки 27ГС

Полученные в работе данные позволили сформулировать возможные пути снижения разупрочняемости при контактной стыковой сварке высокопрочного арматурного проката и предложить для создания свариваемой термомеханически упрочненной арматуры массового применения класса Ат-ЛС (σ_s не менее 750 Н/мм^2) сталь со следующими содержаниями химических компонентов (в % по массе): 0,24–0,30 С; 0,9–1,3 Mn; 0,9–1,5 Si; 0,045 S; 0,045 P; Cu , Ni , Ca 0,3 каждого. Сталь такого состава марки 27ГС защищена а.с. 1386673.

В работе приведена технология производства новой термомеханически упрочненной арматурной стали марки 27ГС различного структурного состояния и уровней прочности.

Дана оценка технологичности в производстве, макроструктуры и химической неоднородности стали по высоте слитка. Новую сталь изучали как в горячекатаном состоянии, так и после упрочнения с отдельного (печного) и прокатного нагревов. После горячей прокатки в профилях № 10...22 сталь 27ГС имеет следующие свойства: $\sigma_{0.2} = 420...425 \text{ Н/мм}^2$; $\sigma_s = 630...635 \text{ Н/мм}^2$; $\delta_5 = 32...29 \%$; $\delta_{10} = 18,4...16,5 \%$ (рис. 2).

Исследованиями микроструктуры установлено, что по всему сечению стержня структура феррито-перлитная с повышенным в сравнении со сталью 20ГС количеством перлита (50/50). Размер зерна соответствует 9...10 баллу. Перлит отличается достаточно высокой дисперсностью и может быть отнесен к тонко- и мелкопла-

тинчатому. В термомеханически упрочненном состоянии получены свойства, соответствующие классу Ат-IV: $\sigma_{0.2} = 820 \dots 850 \text{ Н/мм}^2$; $\sigma_B = 960 \dots 980 \text{ Н/мм}^2$; $\delta_5 = 14,6 \dots 15,5 \%$; $\delta_p = 5,4 \dots 7,0 \%$.

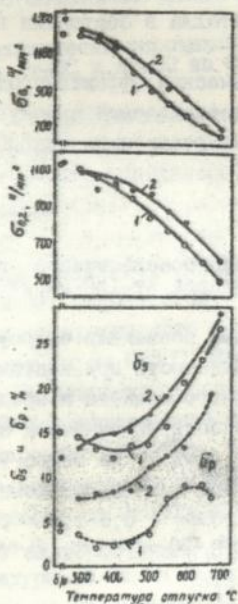


Рис. 2. Диаграмма улучшения арматуры сталей марок 20ГС (1) и 27 (2) диаметром 22 мм.

Микроструктура в поверхностной зоне упрочненных стержней отвечает реечному мартенситу, в переходной зоне — смеси отпускаемого мартенсита, бейнита и эвтектоида. В стержнях с уровнем прочности, соответствующим верхнему пределу класса Ат-IV, в основной части сечения формируется верхний бейнит с некоторым количеством остаточного аустенита и сеткой высокодисперсного эвтектоида по границам бывших аустенитных зерен.

Приведены результаты статистического исследования свариваемости термоупрочненной арматуры из стали 27ГС.

Показано, что прочность сварных соединений термомеханически упрочненной арматуры из стали 27ГС полностью отвечает требованиям класса Ат-IVС (σ_B^0 не менее 800 Н/мм^2). При этом

пластичность сварных соединений вполне удовлетворительна:

= 9...15 %. Разупрочнение в сварных стыках стали 27ГС соответствует 13...15 %, что существенно ниже, чем в стали 20ГС (25...34 %). Более высокая прочность сварных соединений арматуры из стали 27ГС определяется тем, что за счет более высокого содержания в ней углерода по сравнению со сталью 20ГС в зоне полной перекристаллизации сварных соединений наблюдается увеличение количества квазиэвтектоида. Это вносит свой вклад в повышение несущей способности неразъемных соединений при сварке как горячекатаной, так и термоупрочненной арматуры из стали 27ГС. Помимо этого, в ЗТВ сварных соединений термомеханически упрочненной стали 27ГС наблюдается более широкий (порядка 40 %) участок структур, образующихся в результате сварочного нагрева исходного металла в область α - f и последующего охлаждения на воздухе, что приводит к образованию смешанной структуры: полигонального феррита, квазиэвтектоида и бейнита. Это существенно повышает агрегатную прочность сварных стыков. Пластичность сварных соединений из стали 27ГС в 2 раза выше, чем из стали 20ГС, что должно обеспечивать высокую надежность в эксплуатации. Действительно, проведенные в НИИЖБ Госстроя России испытания, показали, что горячекатаная и термомеханически упрочненная арматурная сталь марки 27ГС может свариваться всеми видами контактной, точечной, электродуговой сварки, включая ванную сварку горячекатаной стали.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы процессы структурообразования и формирования свойств сварных соединений термомеханически упрочненного проката различного химического состава и уровней прочности при контактной стыковой сварке методом непрерывного оплавления.

2. Впервые на арматурных сталях 4КП, 20ГС, 10ХГС2 установлена и обоснована принципиальная экспоненциальная зависимость прочности сварных соединений от исходной прочности металла с максимумом, расположенным внутри диапазона всех возможных для соответствующей стали уровней прочности, включая закаленное состояние без отжига.

3. Показано, что в условиях контактной стыковой сварки легирование низкоуглеродистой марганцевистой стали кремнием в количестве до 1,5...2 % существенно увеличивает прочность свар-

ных соединений.

4. Обнаружено, что при контактной стиковой сварке методом непрерывного оплавления заметного перераспределения легирующих элементов (марганца, кремния, хрома) в линии сплавления и прилегающим к ней зонам в сравнении с основным металлом не наблюдается. При сварке резко различных по химическому составу материалов (стали 4КП и 10Х1С2) концентрация марганца, кремния, хрома по линии сплавления изменяется скачкообразно.

5. Исследовано структурное состояние и механические свойства сварных соединений термомеханически упрочненной арматуры после их локальной термообработки со сварочного нагрева. Такая упрочняющая обработка коренным образом повышает несущую способность сварных соединений, поскольку вызывает формирование мартенсита в зоне сплавления, в наружной части зоны термического влияния бейнита и выделенного феррита. Благоприятное сочетание мартенситных и бейнито-мартенситных структур обеспечивает высокую прочность сварных соединений, практически приближая их к прочности исходного металла.

6. Установлено, что при умеренно "жестких" режимах сварки разупрочнение сварного соединения термомеханически упрочненной арматуры при растяжении происходит не по одной структурной области ЗТВ, а по различным ее участкам. Поэтому несущая способность сварного соединения определяется вкладом в работу разрушения как объемной доли структур, возникающих в результате перекристаллизации под действием тепла сварочного пика и сжимающих прочность сварного соединения, так и объема металла с исходными структурами отпуска, сдерживающими разупрочнение при сварке.

7. Разработана в промышленных условиях на металлургическом комбинате "Криворожсталь" новая технология производства термомеханически упрочненной свариваемой бунтовой и стержневой арматуры диаметром 8...18 мм из сталей 4КП двух классов прочности:

- Ат-400С (Ат-ПС) при C_0 не менее 0,241;
- Ат-440С (Ат-ШС) при C_0 не менее 0,325.

Производство такой продукции позволяет снизить расход марганца и кремния соответственно на 15 и 32 % в сравнении с аналогичным прокатом из традиционной стали марки Ст5ПС. Разработаны и внедрены в производство технические условия ТУ 14-15-311-83

"Прокат арматурный термомеханически упрочненный марки Ст4КП".

8. Разработана и внедрена в промышленное производство новая свариваемая термомеханически упрочненная арматурная сталь класса Ат-IVС марки 27ГС, защищенная авторским свидетельством. Эта сталь внесена в ГОСТ 10881-94 и нормативно техническую документацию на ее производство и применение. Экономический эффект от внедрения стали марки 27ГС в строительном производстве железобетонных конструкций составил 2,97 млн.крб./т (в ценах 1994 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Калмыков В.В., Осадченко А.В., Чудновский В.А. Влияние локальной термообработки на структуру и свойства сварных соединений термоупрочненной арматуры при контактной стыковой сварке // Сварочное производство, 1986, № 9, с. 10-11.

2. Осадченко А.В., Ляховацкая Л.Л., Падун Н.И. Сварка термически упрочненных с отдельного нагрева двутавровых балок класса С40 // Сварочное производство, 1989, № 2, с. 14-15.

3. Калмыков В.В., Осадченко А.В., Омесь Н.М. и др. Термомеханически упрочненная арматурная сталь с повышенными эксплуатационными характеристиками // Бетон и железобетон, 1989, № 7 - с. 26-28.

4. Калмыков В.В., Осадченко А.В., Фридман А.М. Контактная стыковая сварка термомеханически упрочненной арматуры при различных уровнях ее прочности // Автоматическая сварка, 1990, № 1 - с. 52-54.

5. Кондратенко В.М., Иващенко В.М., Осадченко А.В. и др. Термическое упрочнение свариваемой арматурной стали диаметром 32 мм // Сталь, 1989, № 6 - с. 70-73.

6. Ковальчук Г.З., Калмыков В.В., Осадченко А.В. и др. Структурные и химические неоднородности при стыковой сварке оплавлением термоупрочненной арматуры // ЦНТБ ЧМ, 1989, № 4 - с. 166.

7. Калмыков В.В., Осадченко А.В. Экономно легированная свариваемая арматурная сталь класса Ат-IVС. Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции // Повышение качества металлопроката путем термической и термомеханической обработки. - Днепропетровск, 1988. - с. 49.

ЛНБ им. В. Стефаника
АН України

8. Узлов И.Г., Калмыков В.В., Осадченко А.В., Грачев В.И. и др. Термомеханически упрочненная свариваемая арматурная сталь Ст4КП классов Ат-ПС и Ат-ШС / Сталь № 7. - С. 55-57.

9. Сталь: А.с. 386673 СССР МКМ С 22 С 38/26. В.В.Калмыков, В.Д.Гладуш, Н.М.Смесь, А.В.Осадченко и др. Открытия. Изобретения. - 1988. - № 13 - С. 18.

10. Способ натяжения термоупрочненной свариваемой арматуры. А.с. 17.16038 СССР МКМ С 09. С 21/12. А.В.Ивченко, А.В.Осадченко, Н.П.Жильцов и др. Открытия. Изобретения. - 1991. № 8. - С. 46.

11. Калмыков В.В., Осадченко А.В. Исследование изменения структуры и свойств термоупрочненной арматуры различных химических составов и уровней прочности при сварке // Проблемы повышения технического уровня производства черных металлов и сплавов: Труды Всесоюзной научно-технической конференции молодых металлургов-исследователей - Донецк 20...22 мая 1987 г. М. Металлургия, 1987 г., с. 108-109.

12. Калмыков В.В., Осадченко А.В., Красовская Г.М. Новая высокопрочная арматура многоцелевого назначения // Тез. докл. Металлы и технический прогресс. Труды Всесоюзной научно-технической конференции "Основные направления повышения качества и служебных свойств металлопродукции из черных металлов и ее рационального использования в народном хозяйстве - Москва 24...26 ноября 1987 - М.: Металлургия, 1987, с. 93-94.

13. Калмыков В.В., Осадченко А.В., Ляховецкая Л.Л. Влияние исходной прочности и содержания углерода на свариваемость термомеханически упрочненной арматуры из стали 20ГС // Тез. докл. Третьей Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение свойств и эксплуатационной надежности термически обработанного проката. - Днепропетровск, май 1988 г. М.: Металлургия, 1988 - с. 34-37.

14. Калмыков В.В., Осадченко А.В., Чудновский В.А. Метод повышения конструктивной прочности сварных соединений термически упрочненных сталей. Тез. докл. Научно-технического семинара "Методы повышения конструктивной прочности металлических материалов". Москва, 1988 г. М.: Металлургия - с. 17-18.

15. Калмыков В.В., Осадченко А.В., Воловик Н.Г., Кондратенко В.М. Новые виды свариваемых термомеханически упроченных арматурных сталей высокой прочности // Металлургические требования производителей и потребителей к свариваемости стальной продукции: Тез. докл. Международного семинара. - Киев, 16-20 сентября 1991. - С. 78.

A.V.Osadchenko. Investigation of structure formation processes and creation of properties of welded joints of thermomechanically hardened steel rolled products.

Kandidat Dissertation on speciality 05.16.01 - Metal Science and Heat Treatment of Metals, Iron and Steel Institute, Ukraine National Academy of Science, Dnepropetrovsk, 1995.

The investigation of structure formation processes and creation of properties of welded joints of thermomechanically hardened reinforcing steel rolled products of different chemical composition and strength under conditions of flash-butt resistance welding is defended by this dissertation.

The principle exponent relationship between strength of welded joints and initial strength of metal with maximum value within the range of all strength values available for given steels including those of as-hardened non-tempered steel has been found. The industrial introduction of results obtained has been realized.

The data of production efficiency are given.

Keywords : structure, technology, properties, steel.

Осадченко А.В. Исследование процессов структурообразования и формирования свойств сварных соединений термомеханически упроченного проката.


Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - металловедение и термическая обработка металлов, Институт черной металлургии НАН Украины, Днепропетровск, 1995 г.

Защищаются исследования процессов структурообразования и формирования свойств сварных соединений термомеханически упрочненного арматурного проката различного химического состава и уровней прочности при контактной стыковой сварке методом непрерывного оплавления.

На арматурных сталях 4КП, 20ГС, 10ХГС2 установлена и обоснована принципиальная экспоненциальная зависимость прочности сварных соединений от исходной прочности металла с максимумом, расположенным внутри диапазона всех возможных для соответствующей стали уровней прочности включая закаленное состояние без отпуска.

Осуществлено промышленное внедрение полученных результатов исследования, приводятся данные эффективности в процессе производства.

Ключевые слова: структура, технология, пластичность, сталь.



Подписано к печати 26 июня 1995 г.

Формат 60x84/16

Бумага Тип. № 3. Печать офсетная.

Уч.-изд. л. 2, 08. Усл. печ. л. 2, 6

Тираж 100 экз. Зак. № 1411

ИЧМ, 320050, г. Днепропетровск,
пл. Акад. Стародубова, 1

453973

AB 32 715

AB 32.715