

Г.В.Левченко, Т.В.Грицай, В.С.Вахрушева, А.Д.Мальш,
Н.Г.Кучеренко

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ ТЕРМОУПРОЧНЕННОГО И ГОРЯЧЕКАТАНОГО АРМАТУРНОГО ПРОКАТА

Рассмотрены результаты испытаний свариваемости арматуры из проката различных классов прочности. Показано, что степень разупрочнения проката и прочность сварного соединения в первую очередь зависят от исходного состояния проката. Структура зон термического влияния горячекатаного и термоупрочненного проката имеют существенные отличия.

Постановка задачи. Арматурный прокат, используемый в строительстве, должен обладать не только высокими прочностными и пластическими свойствами, но и удовлетворительной свариваемостью. В действующих стандартах свариваемость косвенно оценивается с помощью углеродного эквивалента C_{Σ} (обобщающего показателя химического состава).

Практически во всех отечественных и зарубежных стандартах указывается, как правило, только максимально допустимое значение углеродного эквивалента для каждого класса арматурного проката. И лишь в ГОСТ 10884 и в ДСТУ 3760 устанавливаются и минимально допустимые значения углеродного эквивалента. Таким образом, можно считать, что свариваемость арматурного проката не будет обеспечена, если величина углеродного эквивалента стали, из которой он изготовлен, выходит за пределы, установленные стандартом.

Анализ реального марочного состава сталей, применяемых на отечественных предприятиях для производства арматурного проката, показал, что величина углеродного эквивалента этих сталей во многих случаях не попадает в диапазон значений регламентируемых стандартами [1].

Цель работы. В связи с необходимостью уточнения степени влияния углеродного эквивалента на свариваемость разных типов стали, а особенно целесообразности регламентации нижней его границы, была проведена работа по исследованию влияния исходного состояния арматурного проката и химического состава стали на структуру и прочностные характеристики сварных соединений.

Методика исследования. Материалом исследования служил промышленный термоупрочненный арматурный прокат класса А500С и горячекатаный прокат класса А400С, произведенный на меткомбинате «Криворожсталь». Сварку соединений оплавлением производили на Днепровском заводе мостовых железобетонных конструкций, а электродуговым способом – в условиях ОАО «Стальмонтажсервис». Отбирали по три образца от каждой пробы. Механические испытания образцов проводили на оборудовании Трубногo института.

Химический состав, исходные механические свойства, проката и свойства исследуемых сварных соединений представлены в таблице.

Как известно [2], прочность сварного соединения может повышаться только при сварке горячекатаной арматуры, т.е. средняя прочность зоны термического влияния будет выше прочности основного металла. А при сварке термоупрочненных образцов зона термического влияния в результате действия сварочного тепла, будет иметь меньшую прочность, чем основной металл.

Изложение основных материалов исследования. Исследования показали, что сварная прочность термоупрочненных стержней при использовании контактной стыковой сварки оказывается практически на одном уровне, независимо от диаметра проката (рис.1а). Это объясняется тем, что при контактной стыковой сварке площадь зоны разупрочнения равна площади поперечного сечения стержня, поэтому нет четкой зависимости степени разупрочнения от диаметра проката. Сварная прочность незначительно увеличивается при повышении исходной прочности стержней (рис.1б).

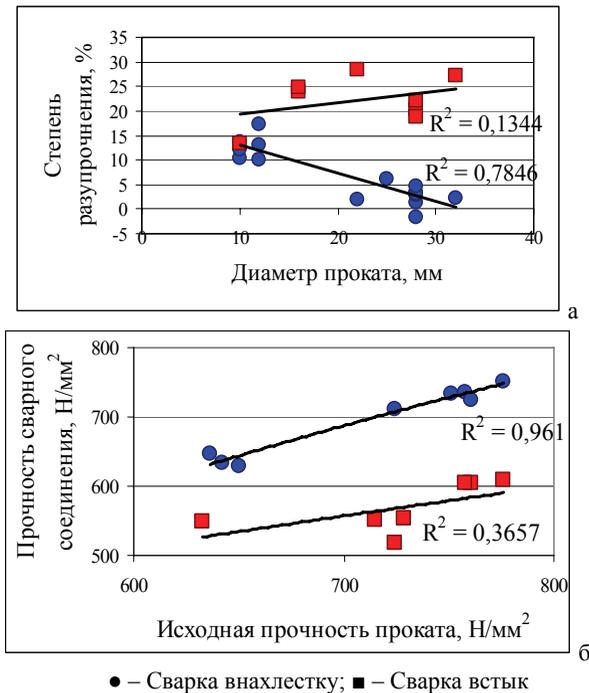


Рис. 1. Влияние диаметра термоупрочненного арматурного проката на степень разупрочнения (а) и исходной прочности на прочность сварного соединения (б)

Таблица. Химический состав стали и механические свойства исследуемых прката в исходном состоянии и после сварки.

№ п/п	Марка стали	Диаметр проката, мм	Содержание химических элементов, %			C _v , (по ДСТУ 3760)	Механические свойства								
			C	Mn	Si		Исходное состояние			Электродуговая ручная сварка, нахлесточное соединение			Контактная стыковая сварка оплавлением		
							σ_{Γ} , Н/мм ²	σ_{B} , Н/мм ²	δ_{10} , %	σ_{Γ} , Н/мм ²	σ_{B} , Н/мм ²	δ_{10} , %	D σ_{B} , %	σ_{B} , Н/мм ²	δ_{10} , %
1	Ст3пс	10	0,20	0,62	0,07	0,303	624	711	15,3	615	7,5	13,5			
2	Ст3пс	10	0,19	0,59	0,08	0,288	632	727	14	653	7	10,2			
3	Ст3пс	10	0,18	0,63	0,06	0,285	618	705	15	620	7	12,1			
4	Ст3пс	10	0,18	0,54	0,04	0,27	549	633	15				549	7,4	13,3
5	Ст3пс	12	0,21	0,56	0,09	0,303	625	702	13	581	8	17,2			
6	Ст3пс	12	0,20	0,56	0,06	0,293	614	686	13	596	7,5	13,1			
7	Ст3пс	12	0,21	0,61	0,09	0,312	618	693	15	624	6,5	10			
8	Ст3пс	16	0,19	0,69	0,06	0,305	599	729	11				553	7	24
9	Ст3пс	16	0,19	0,58	0,05	0,287	600	715	15				551	7	24,8
10	Ст3пс	22	0,17	0,56	0,10	0,311	558	724	15,5	711		1,8	518	10,9	28,5
11	Ст3Гпс	28	0,21	1,19	0,03	0,408	504	642	17	633	12,8	1,4			
12	Ст3Гпс	28	0,21	1,18	0,03	0,407	507	650	16,3	628	13	3,4			
13	Ст3Гпс	28	0,22	1,20	0,04	0,42	496	636	15	647	12	-1,7			
14	Ст3Гпс	28	0,21	1,23	0,03	0,415	625	758	14	736	11,5	2,9	604	7,1	22,2
15	Ст3Гпс	28	0,21	1,21	0,03	0,412	630	776	11	752	8	3,1	609	4,6	18,8
16	Ст3Гпс	28	0,21	1,10	0,03	0,393	624	761	12	725	8	4,7	604	6,5	20,3
17	Ст3пс	32	0,28	0,78	0,09	0,331	572	751	11,3	734	-	2,3	547	5	27,2
18	30ГС	25	0,26	1,1	0,64	0,484	455	640	26	600	-	6,2	616	15,5	3,8

При контактном стыковом способе сварки происходит разупрочнение проката (до состояния близкого к горячекатаному). Также значительно снижаются и пластические свойства. Появляется сильная разность напряжений по длине проката. В результате проведенных исследований, обнаружено, что определяющим фактором при данном виде сварки является углеродный эквивалент, с увеличением которого и повышается прочность сварного соединения (см. рис. 2а, б).

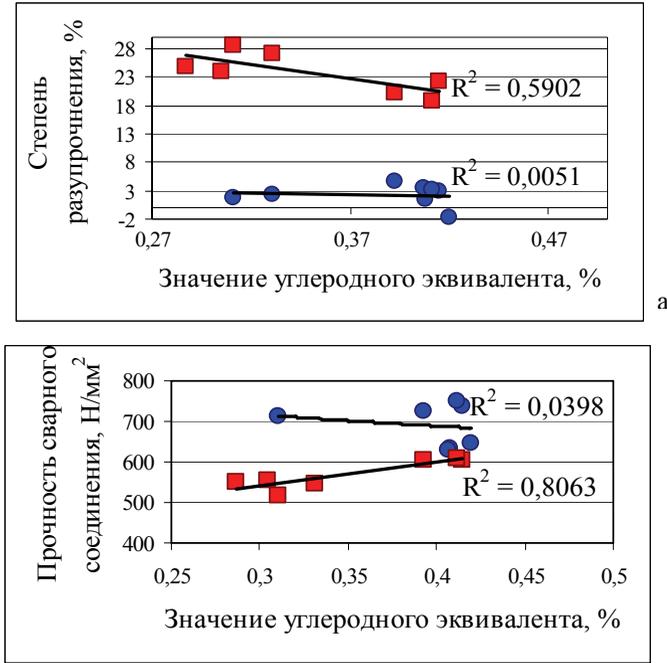


Рис.2. Влияние величины углеродного эквивалента на степень разупрочнения (а) и на прочность сварного соединения (б) термоупрочненного арматурного проката. ● – Сварка внахлестку (диаметр проката более 22 мм); ■ – Сварка встык

Рассмотрим подробнее влияние легирующих элементов на прочность сварного соединения. Оценивая влияние легирующих элементов на свариваемость проката, следует учесть тот факт, что данная зависимость будет полностью соответствовать только рассматриваемому виду сварки. Это связано с тем, что основополагающим фактором, влияющим на свариваемость проката, является скорость охлаждения свариваемого металла, а, следовательно, технология сварки и конструкция сварного соединения [3].

При оценке механических испытаний на прочность необходимо учитывать то, что разрушение сварного соединения происходит не по одной

структурной области зоны термического влияния, а по различным структурным участкам [4]. Поэтому необходимо учитывать структуру всех участков зоны термовлияния, т.е. все слои металла, в которых происходили какие-либо изменения под действием сварочного тепла (рис.3). В участках зоны термического влияния, которые претерпевали нагрев выше температуры A_{C1} (рис.3а, б), с увеличением содержания углерода повышается устойчивость аустенита и распад его проходит при более низких температурах, при которых процессы диффузии затруднены. Поэтому структура продуктов распада аустенита с ростом содержания углерода будет более дисперсная, а значит и прочность металла с такой структурой будет выше.

Что касается тех участков, в которых происходил дополнительный отпуск стали (рис.3в), то здесь также проявляется упрочняющее действие углерода. С повышением содержания углерода в феррит при отпуске выделяется большее количество карбидов и поэтому разупрочнение этих участков меньше. Но все же увеличение содержания углерода более 0,37% в составе стали связано с риском получения в зоне термовлияния хрупких структур и образования кристаллизационных трещин.[5] В нашем случае изменение углеродного эквивалента происходило, в основном, за счет увеличения содержания марганца.

Известно [6], что марганец наиболее заметно из всех легирующих элементов влияет на кинетику распада аустенита, затормаживая его превращение. И поэтому при наличии марганца превращение аустенита в участках зоны термического влияния, нагреваемых выше температуры A_{C1} , сдвигается в область более низких температур и участки перлита измельчаются, увеличивается дисперсность перлита. Кроме заметного измельчения перлитной составляющей, марганец, являясь карбидообразующим элементом, упрочняет феррит и цементит. Наличие же в составе стали кремния, приводит к тому, что процессы, проходящие при отпуске, затормаживаются, вследствие повышения кремнием критических точек A_{C3} и A_{C4} . Повышение содержания марганца и кремния в составе стали приводит к упрочнению всех участков зоны термического влияния.

Таким образом, подтверждается нецелесообразность применения в сварных соединениях, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением, стержневой арматуры с высокой степенью термоупрочнения и малым содержанием углеродного эквивалента (меньше нижнего предела, указанного в отечественных стандартах), в связи с тем, что такая арматура при сварке разупрочняется сильнее, чем прокат с такой же прочностью, но с большим содержанием легирующих элементов.

Главными факторами, влияющими на прочность сварного соединения, при электродуговом способе сварки внахлест, являются исходная прочность проката и диаметр стержня (рис.1).

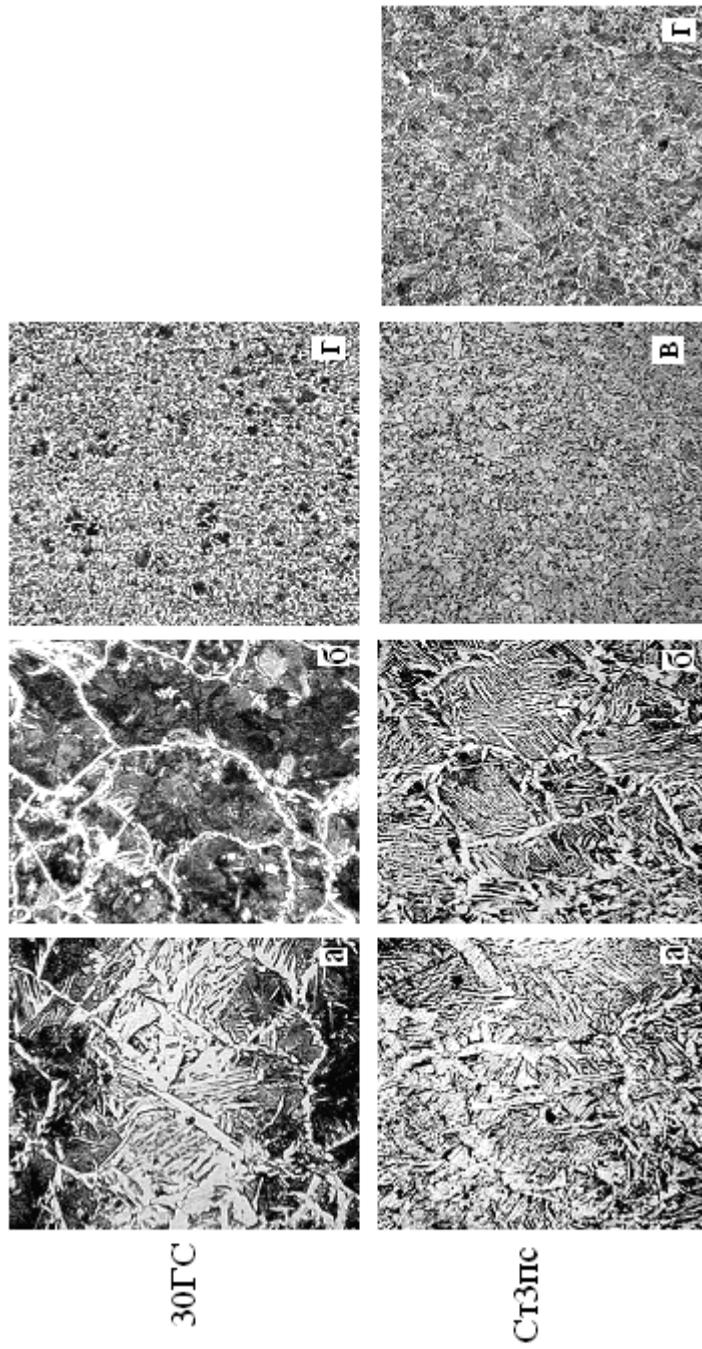


Рис.3. Микроструктуры сварного шва (а), участка перегрева (б), участка высокого отпуска (в) и основного металла (г) в сварных соединениях горячекатаных стержней марки 30ГС – I и термически упрочненных стержней марки St3пс – II. х 50.

При увеличении диаметра проката прочность сварного соединения возрастает. Это объясняется тем, что размер зоны термического влияния с уменьшением поперечного сечения арматурного проката увеличивается. А при сварке стержней малого диаметра площадь зоны термического влияния равна всей площади поперечного сечения проката. Кроме того, при уменьшении диаметра стержневой арматуры происходит более сильное разупрочнение участка зоны термического влияния, нагреваемого в процесс сварки до температур $500^{\circ}\text{C} - A_{C1}$, так как скорость отвода тепла уменьшается и, соответственно, увеличивается продолжительность пребывания металла этой зоны при температуре, превышающей температуру отпуска стали и в результате этого более полно протекают процессы отпуски (коалесценция и сфероидизация).

То есть, при данном виде сварки при использовании термоупрочненной стержневой арматуры больших диаметров (более 22 мм) главную роль играет исходная прочность проката, практически независимо от значения углеродного эквивалента (даже при значении углеродного эквивалента ниже регламентируемого стандартами разупрочнение арматуры составило не более 2,5%). При уменьшении диаметра проката следует обратить внимание, что наряду со значением исходной прочности на прочность сварного соединения будет существенно влиять и значение углеродного эквивалента.

При использовании горячекатаного проката независимо от способа сварки происходит небольшое разупрочнение. При контактной стыковой сварке оплавлением и при электродуговой сварке внахлест разупрочнение произошло в результате образования в зоне термического влияния хрупких структурных составляющих (рис.3). Поэтому при сварке именно горячекатаного проката следует соблюдать верхнюю границу значений углеродного эквивалента. Незначительное разупрочнение горячекатаного проката при всех видах сварки объясняется отсутствием в структуре зоны термического влияния участка высокого отпуска (рис.3в) в сравнении с термоупрочненным прокатом. Можно считать, что превалирующим показателем свариваемости при каждом виде сварки будут значения углеродного эквивалента и исходной прочности стали. Отличие горячекатаного арматурного проката от термоупрочненного объясняется тем, что термическая обработка уменьшает влияние химического состава. При электродуговой сварке внахлест на прочность сварного соединения из горячекатаного арматурного проката, также как и термоупрочненного, влияет диаметр свариваемых стержней.

Выводы. Рассмотрены особенности строения сварного соединения арматурного проката различных классов прочности. Прочность нахлесточных сварных соединений из термоупрочненного проката в значительной мере определяется исходной прочностью, а изменение величины углеродного эквивалента в исследуемых пределах не оказывает существен-

ного влияния на степень разупрочнения стали. Несмотря на низкое содержание углерода и марганца в прокате класса А500С из Ст3пс ($C_2 < 0,358$) и высокую степень разупрочнения, качество сварных соединений соответствует требованиям ДСТУ 3760 и ГОСТ 14098 (временное сопротивление сварного соединения не ниже 540 Н/мм²).

Прочность соединений из термоупрочненного арматурного проката, полученных методом стыковой сварки оплавлением, не зависит от его исходной прочности и находится на нижнем, допустимом, стандартом уровне. Однако степень разупрочнения этих соединений снижается при увеличении углеродного эквивалента стали.

Поэтому при сварке горячекатаного арматурного проката совместно с исходными свойствами необходимо соблюдать верхнюю границу требуемого стандартом значения углеродного эквивалента, а при использовании термоупрочненного проката – нижнюю его границу, особенно при использовании жестких режимов сварки.

1. *Арматурний прокат: порівняльний аналіз стандартизованих показників зварюваності* / Г. Левченко, Є. Рибалка, Т. Грицай та ін. // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2007. – №2. – С.17–20.
2. *Худик Ю.Т.* Влияние сварки на прочность термически упрочненной арматурной стали // Упрочняющая механическая и термомеханическая обработка проката. – УкрНИИНТИ. – 1968. – С.36–39.
3. *Исследование* свариваемости арматурного проката классов Вst 500 и А500с / Г.В. Левченко, В.С. Вахрушева, А.Д. Малыш и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2005. – Вып. 10. – С. 223–230.
4. *Худик Ю.Т.* Изменение свойств термически упрочненной стали под влиянием тепла, выделяющегося при электросварке: Дис. канд. техн. наук. – Днепропетровск., 1969. – 356с.
5. *Соколовский П.И.* Арматурные стали // – М.: Металлургия, 1964. – 210с.
6. *Гуляев А.П.* Металловедение. // – М.: Металлургия, 1977. – 645с.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. В.В.Парусовым*