

Евгений Алексеевич МОЙСЕЙЧИК,
кандидат технических наук,
доцент кафедры
"Сопротивление материалов
и теория упругости"
Белорусского национального
технического университета

ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ С КВАЗИКОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

STRENGTH OF WELDED JOINTS OF REINFORCING BARS WITH QUASI-COMPOSITE STRUCTURE

В статье приводятся исследования изменения сопротивления разрушению при растяжении образцов из арматурных стержней с исходным квазикомпозитным строением и различными конструктивно-технологическими дефектами. Также выявлено, что механические воздействия на стержни (незначительные надрезы, насечки зубилом) несущественно сказываются на их временном сопротивлении при деформировании в условиях положительных температур.

The studies of changes in tensile fracture resistance of the reinforcing bar samples having quasi-composite structure and various structural and technological defects have been presented in this paper. It was founded that the mechanical effects (minor cuts and notches) had no significant influence on the breaking strength of the reinforcing bars during their deformation under conditions of positive temperatures.

ВВЕДЕНИЕ

Для различных элементов железобетонных конструкций обычно используют термоупрочненную арматуру, например, класса S500 [1]. Поперечные сечения такой арматуры имеют квазикомпозитное (слоистое) строение [2–6]. Это предопределено различиями в условиях структурообразования приповерхностных и внутренних слоев арматурных стержней в процессе металлургического производства: если в приповерхностных слоях процесс превращения аустенита происходит на стадии закалки при охлаждении, то процессы структурообразования в середине стержня протекают на стадии самоотпуска в условиях, приближенных к изотермическим. В результате по сечению термоупрочненных изделий формируются слои с различными структурно-фазовыми состояниями и физико-механическими характеристиками. Технологические приемы производства такой арматуры были разработаны в конце прошлого века [7–10], а детальные исследования строения таких арматурных стержней, их состава и механических свойств начали проводиться лишь в последние годы [2–6, 11–13].

При образовании изделий из термоупрочненной арматуры необходимо учитывать особенности их строения [14–17]. В настоящее время применяют три основных метода соединения арматурных стержней: сварное, внахлестку без сварки, механическое. Для стыкования арматурной стали S500 практически без ограничения применяются следующие виды дуговой сварки: ручная дуговая протяженными швами, внахлестку и с накладками, ванно-шовная, многослойными швами на стальной скобе-накладке, дуговая в крест. Механические соединения (стыки) арматуры выполняются с помощью опрессованных и резьбовых муфт.

Соединения арматуры с использованием сварки в современной строительной практике распространены достаточно широко. Особенности сварки прокатных изделий (включая арматуру) являются:

1) сравнительно высокие скорости нагревания и охлаждения;

2) непродолжительное время пребывания металла шва в расплавленном состоянии;

3) непрерывное перемещение фронта кристаллизации вслед за источником тепла;

4) кристаллизация и набор прочности соединением при значительном градиенте температур;

5) высокий нагрев отдельных объемов металла соединения [14–17].

В термомеханически упрочненной арматуре при повторном нагреве образуются метастабильные структуры [16]. Целью настоящей статьи является выявление изменений прочности и структуры арматурных стержней с исходным слоистым (квазикомпозитным) строением, перераспределения углерода в шве и околошовных зонах и особенностей разрушения сварных соединений стержней.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы со сварочными воздействиями вырезали после испытаний при комнатной температуре на разрыв сварных соединений с наплавками, сварными швами и другими дефектами (таблица 1), которые проводили в соответствии с ГОСТ 1497 на универсальной испытательной машине Р-100. Для исследования исходной структуры использовали образцы диаметром 12, 25 мм из арматурного проката S500 (таблица 2), изготовленного по ТУ РБ 04778771.001-97 на РУП "Белорусский металлургический завод", из которых отбирались пробы, затем вырезали заготовки, темплеты и готовили шлифы. Подготовка проб производилась фрезой при малых оборотах и интенсивной подаче охлаждающей жидкости в зону реза. Структурную неоднородность выявляли по измерениям микротвердости прибором Micromet-II с нагрузкой на призму 100 г в соответствии с требованиями ГОСТ 9450. Исследование морфологии образцов с ненарушенной сваркой структурой проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Mira компании Tescan (Чехия). Микроскоп оснащен детекторами вторичных электронов SE и обратно отраженных электронов

Таблица 1. Схемы экспериментальных образцов со сварочными и другими конструктивно-технологическими дефектами

Тип образца	Схема экспериментального образца	Тип образца	Схема экспериментального образца
1		8	
2		9	
3		10	
4		11	
5		12	
6		13	
7		14	

Таблица 2. Характеристики арматурных стержней

Класс арматуры	Диаметр, мм	Химический состав, %										Механические свойства			
		C*	Si*	Mn*	P**	S**	Cr*	Ni*	Cu*	As*	N ₂ **	$\sigma_{\text{т}}$, Н/мм ²	$\sigma_{\text{в}}$, Н/мм ²	Δ_5 , %	Угол изгиба, град
S500	12	19	18	60	23	16	8	9	20	1	8	585,0	675,0	25,5	90°
	25	18	19	58	9	16	13	10	21	1	9	550,0	660,0	20,5	90°

* Увеличенное в 100 раз;

** Увеличенное в 1000 раз.

Примечание — Позиции 1, 2: прокат арматурный и термомеханически упрочненный по ТУ РБ 04778771.001-97, РУП "БМЗ".

BSE, которые позволяют проводить исследование образцов в двух режимах. Исследование структуры образцов со сварочными воздействиями проводили на световом микроскопе MeF-3 компании Reichert (Австрия) при увеличении $\times 100$, $\times 200$, $\times 500$. Структура устанавливалась по ГОСТ 8233, оценка балла видманштетта — по ГОСТ 5640. Исследование изменений элементного состава при сварочных воздействиях проводили с помощью микроанализатора INCA 350 компании Oxford Instruments (Англия), посредством которого можно выявлять элементы от бора до урана. Минимальный предел обнаружения элемента — 0,5 процента; погрешность метода — 3,0—5,0 относительных процентов.

Сварка выполнялась на постоянном токе обратной полярности в режиме: $I_{\text{св}} = 200\text{--}220$ А, $U_{\text{д}} = 25\text{--}27$ В, $v_{\text{св}} = 12\text{--}14$ м/ч, примерный расход углекислого газа 16 л/мин.

ПРОЧНОСТНЫЕ, МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ И ЭЛЕМЕНТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Изменение разрушающих напряжений при растяжении образцов типов 1–14 (см. таблицу 1) с рабочими стержнями диаметрами 12, 25, 32 мм показано на рис. 1. Макро- и микроструктура слоев арматурных стержней со сварочными воздействиями приведена в таблице 3. Изменение микротвердости по сечениям арматурных стержней со сваркой приведены на рис. 2–6. Результаты исследований элементного состава после испытания соединения стержней фланговыми швами (на примере образца № 65) даны на (рис. 7–12). Распределение углерода на участках фрагмента образца приведено на спектрограммах, графиках и показано в форме наложения на фотографии микроструктуры (рис. 10–12).

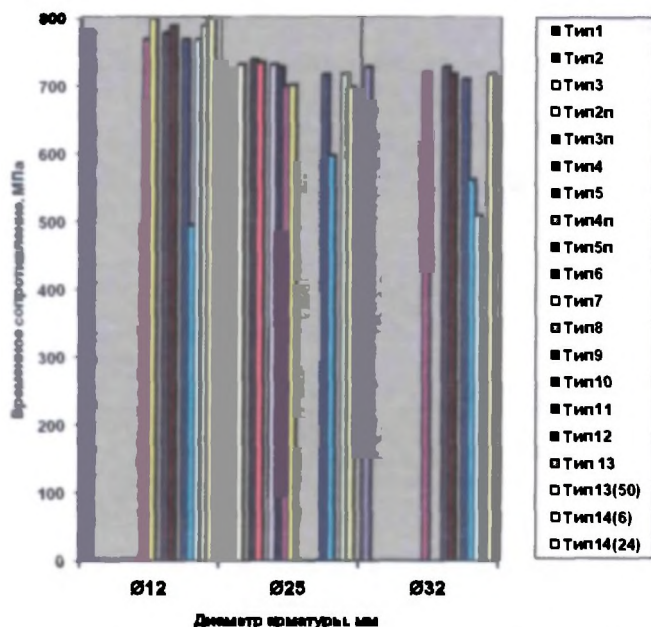


Рис. 1. Изменение разрушающих напряжений образцов типов 1–14 по таблице 1 с рабочими стержнями диаметрами 12, 25, 32 мм

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОСОБЕННОСТИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СЛОИСТЫХ СТЕРЖНЕЙ

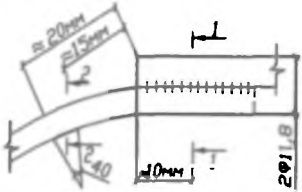
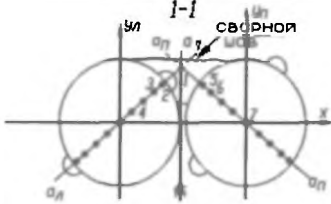
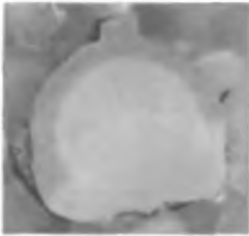
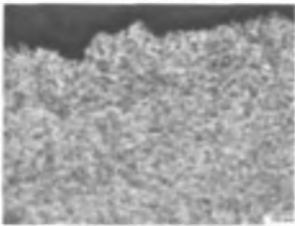
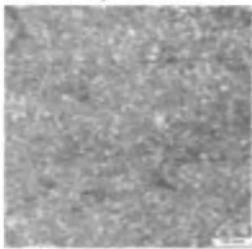
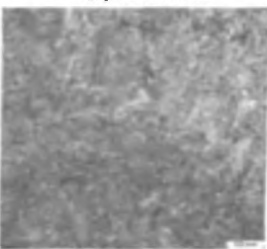
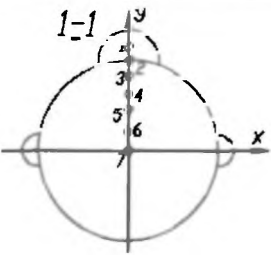
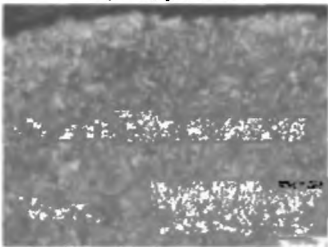
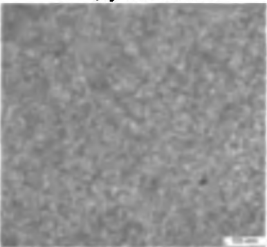
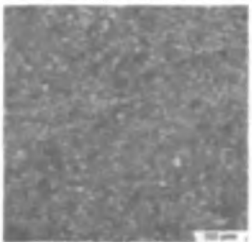
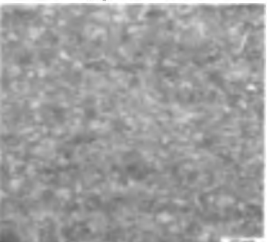
Из рис. 1 следует, что разрушающие напряжения рабочих стержней существенно зависят от вида их деформаций. Механические воздействия на арматуру (незначительные надрезы, насечки зубилом) несущественно сказываются на ее временном сопротивлении при деформировании в условиях положительных температур. Наибольшее снижение прочности проявили образцы со сварочными ожогами на поперечных ребрах и с односторонними накладками.

Появление изгиба накладок приводит к значительному уменьшению разрушающих напряжений. При этом существенную роль играет величина зазора между стыкуемыми стержнями в соединениях. С увеличением зазора прочность изгибаемых накладок снижается. Эти воздействия в большей мере влияют на проявление текучести материала образцов, изломы образцов и сужение в изломах. Места механических и сварочных воздействий служили очагами, в которых развивались пластические деформации и зарождались трещины.

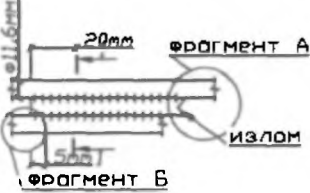
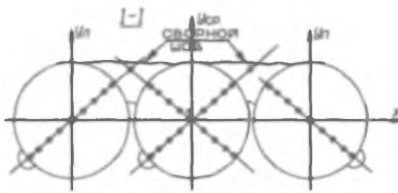
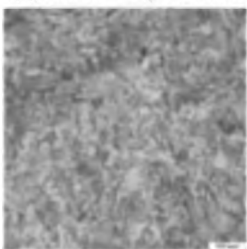
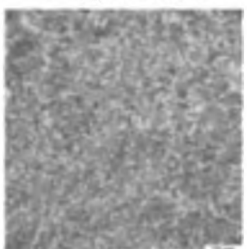
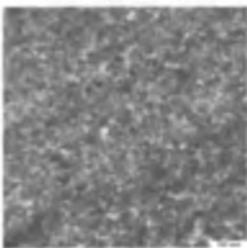
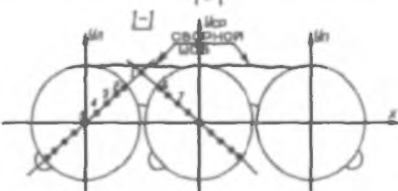
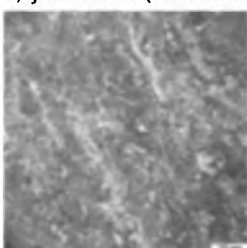
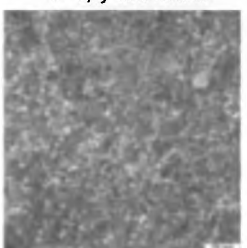
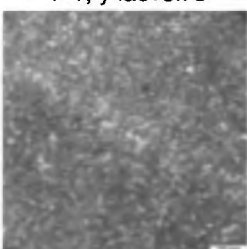
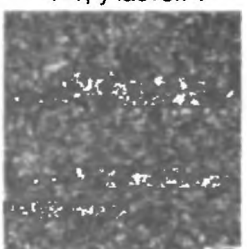
Таблица 3. Характеристики сечений и участков соединений

Образец, сечение	Характерные схемы, макроструктура сечений, микроструктура зон сечений	
1	2	3
Образец № 13, Ø12 мм, сеч. 1–1, наплавка на поперечное ребро		
	1-1, участок 2 	1-1, участок 5
Образец № 57, Ø12 мм, сеч. 1–1, наплавка на продольное ребро		
	1-1, край, у излома 	1-1

Продолжение таблицы 3

1	2	3
Образец № 41, $\varnothing 12$ мм, сеч. 1-1, 2-2, соединение фланговым швом		
	2-2 	1-1 
	2-2, край 	2-2, участок 2 
	2-2, участок 4 	1-1, участок 2 
Образец № 57-1, $\varnothing 25$ мм, сеч. 1-1, наплавка на продольное ребро	1-1 	Вид сечения YOZ 
	1-1 край, участок 1 	1-1, участок 2 
	1-1, участок 3 	1-1, участок 7 

Продолжение таблицы 3

1	2	3
Образец № 65, $\varnothing 12$ мм, сеч. 1-1, соединение фланговыми швами, участки 2-5 — левый стержень		
	1-1 	
	1-1, участок 1 (наплавка) 	1-1, участок 2 
	1-1, участок 3 	1-1, участок 5 
	1-1 	1-1 
Образец № 54, $\varnothing 25$ мм, сеч. 1-1, соединение фланговыми швами	1-1, участок 1 (наплавка) 	1-1, участок 2 
	1-1, участок 3 	1-1, участок 4 

Окончание таблицы 3

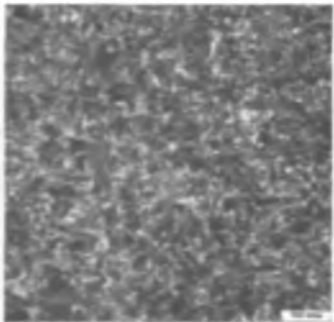
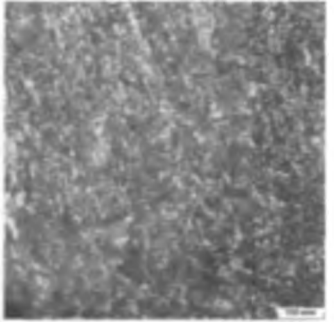
1	2	3
Образец № 54, Ø25 мм, сеч. 1-1, соединение фланговыми швами	1-1, участок 5	1-1, участок 6
		



Рис. 2. Микротвердость в сечениях 1-1, 2-2 образца № 13: ряд 1 — поперечное сечение 1-1, от наплавки к центру стержня; ряд 2 — продольное сечение 2-2, от края поверхности к центру



Рис. 5. Микротвердость в сечениях 1-1, 2-2 образца № 57-1: ряд 1 — сечение 1-1, от наплавки к центру стержня; ряд 2 — продольное сечение 1-1, от края к центру

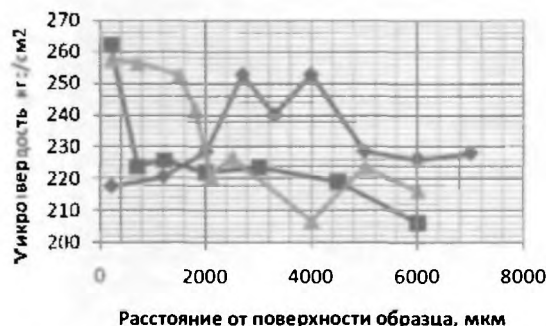


Рис. 3. Микротвердость в сечениях 1-1, 2-2 образца № 57: ряд 1 — поперечное сечение 1-1, от наплавки к центру стержня; ряд 2 — продольное сечение 1-1, от излома к исходному; ряд 3 — поперечное сечение 2-2, от поверхности к центру исходное



Рис. 6. Изменение микротвердости в сечениях 1-1, 2-2 образца № 54: ряд 1 — сечение 1-1, от шва к центру левого стержня; ряд 2 — сечение 1-1, от шва к центру правого стержня; ряд 3 — начало флангового шва, от шва к центру левого стержня

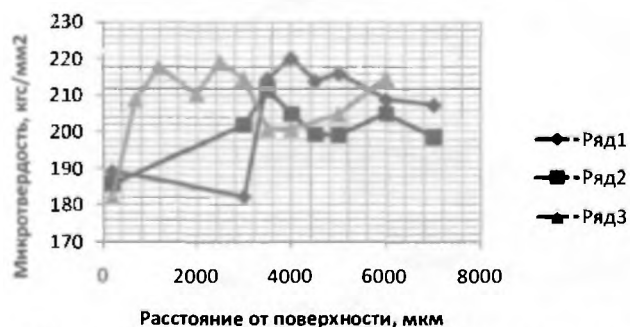


Рис. 4. Микротвердость в сечениях 1-1, 2-2 образца № 41: ряд 1 — сечение 1-1, от шва к центру левого стержня; ряд 2 — сечение 1-1, от шва к центру правого стержня; ряд 3 — сечение 2-2, от излома шва к центру

Механические свойства металла шва и сварного соединения зависят от его структуры, которая определяется химическим составом, режимом сварки и предыдущей и последующей термической обработкой [14–17]. Химический состав металла шва зависит от доли участия основного и электродного металлов в образовании шва и взаимодействий между металлом, газовой фазой (флюсом). Основным легирующим элементом в низкоуглеродистой стали исследованной арматуры является углерод, содержание которого и определяет механические свойства стали вне сварного шва. Повышение его содержания усложняет технологию сварки и затрудняет возможности получения равнопрочного сварного соединения без дефектов. Углеродный эквивалент рассматриваемой стали равен $C_s = 0,33\text{--}0,39$, т. е. горячекатаные арматурные стали

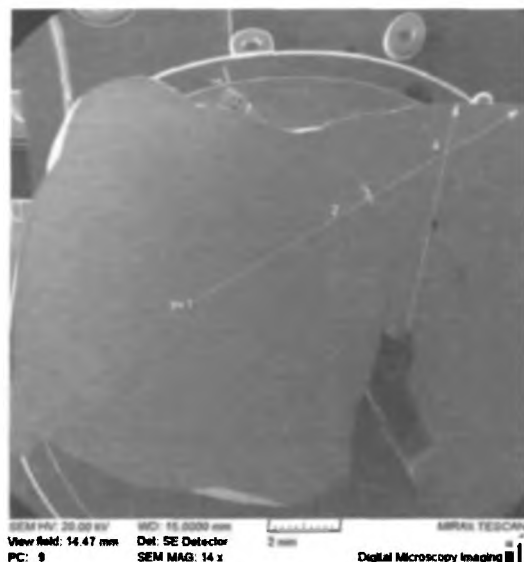


Рис. 7. Общий вид образца № 65 и схема расположения участков 1–4

были бы не склонны к образованию трещин и для их сварки не потребовалось бы специальных технологических мероприятий [17]. Например, согласно австрийским нормам для обеспечения свариваемости арматуры металл должен иметь углеродный эквивалент не выше 0,50 % при содержании углерода не выше 0,22 % ([18], с. 166). По современным украинским нормам (ДСТУ 3760:2006) сталь класса S500 считается свариваемой при углеродном эквиваленте в пределах 0,30 %–0,52 % и содержании углерода в металле не более 0,25 %.

Сравнительное распределение углерода в различных зонах шва показано на графике рис. 11. На участке 4 (сварной шов) наблюдается повышенное содержание марганца. Меньшее содержание углерода в металле шва предупреждает образование структур закалочного характера при повышенных скоростях охлаждения. Возможное снижение прочности металла шва, вызванное уменьшением содержания углерода, может быть скомпенсировано легированием металла марганцем через сварочную проволоку. Марганец (сине-фиолетовый цвет на рисунках) относительно равномерно распределен по материалу шва. По отсутствию элементов на отдельных участках можно уверенно идентифицировать эти участки как поры.

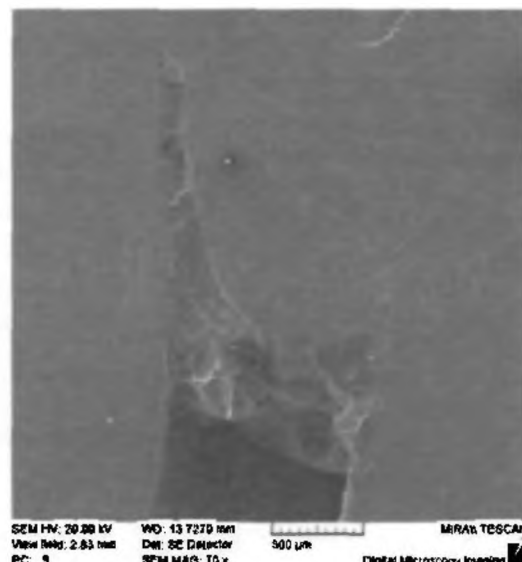


Рис. 8. Фрагмент непровара в корне шва образца № 65

В окрестности отдельных пор заметны повышенные отложения марганца и углерода. Наличие в стали образцов легирующих элементов изменяет ход процессов образования и распада карбидов. При этом одни легирующие элементы повышают (кремний, никель, медь), а другие понижают (марганец) термодинамическую активность углерода, и тем самым влияют на диффузионные процессы с участием углерода. Легирование стали марганцем приводит к замедлению диффузии углерода и торможению выделения карбидов из пересыщенного феррита, в результате чего содержание марганца и углерода в феррите при повышенных температурах сохраняется на верхнем пределе. Марганец и никель понижают устойчивость пересыщенного твердого раствора. Существенно тормозит карбидообразование кремний. Легирование стали хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием, титаном, кремнием, кобальтом обеспечивает сохранение решетки феррита вплоть до температуры 450 °C–500 °C. Азот в стали выполняет примерно такую же роль, как углерод. Требуется дополнительное изучение влияния меди на процессы деформирования строительных сталей [19].

Механические свойства металла околошовной зоны зависят от конкретных условий сварки и от вида термической обработки стали до сварки [17]. Конечную структуру металла в отдельных участках зоны термического влияния, определяет термический цикл, которому подвергался металл в этом участке при сварке. Решающими факторами термического цикла сварки являются максимальная температура участка и скорость его охлаждения. Ширина и конечная структура различных участков зоны термического влияния определяются способом и режи-

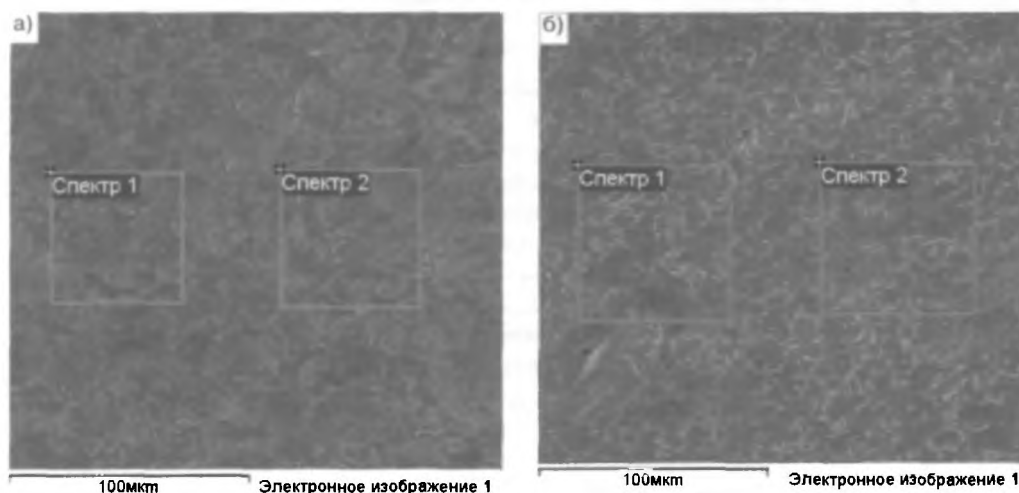


Рис. 9. Вид микроструктуры участков 1(а), 2(б) и расположение зон спектрального анализа образца № 65

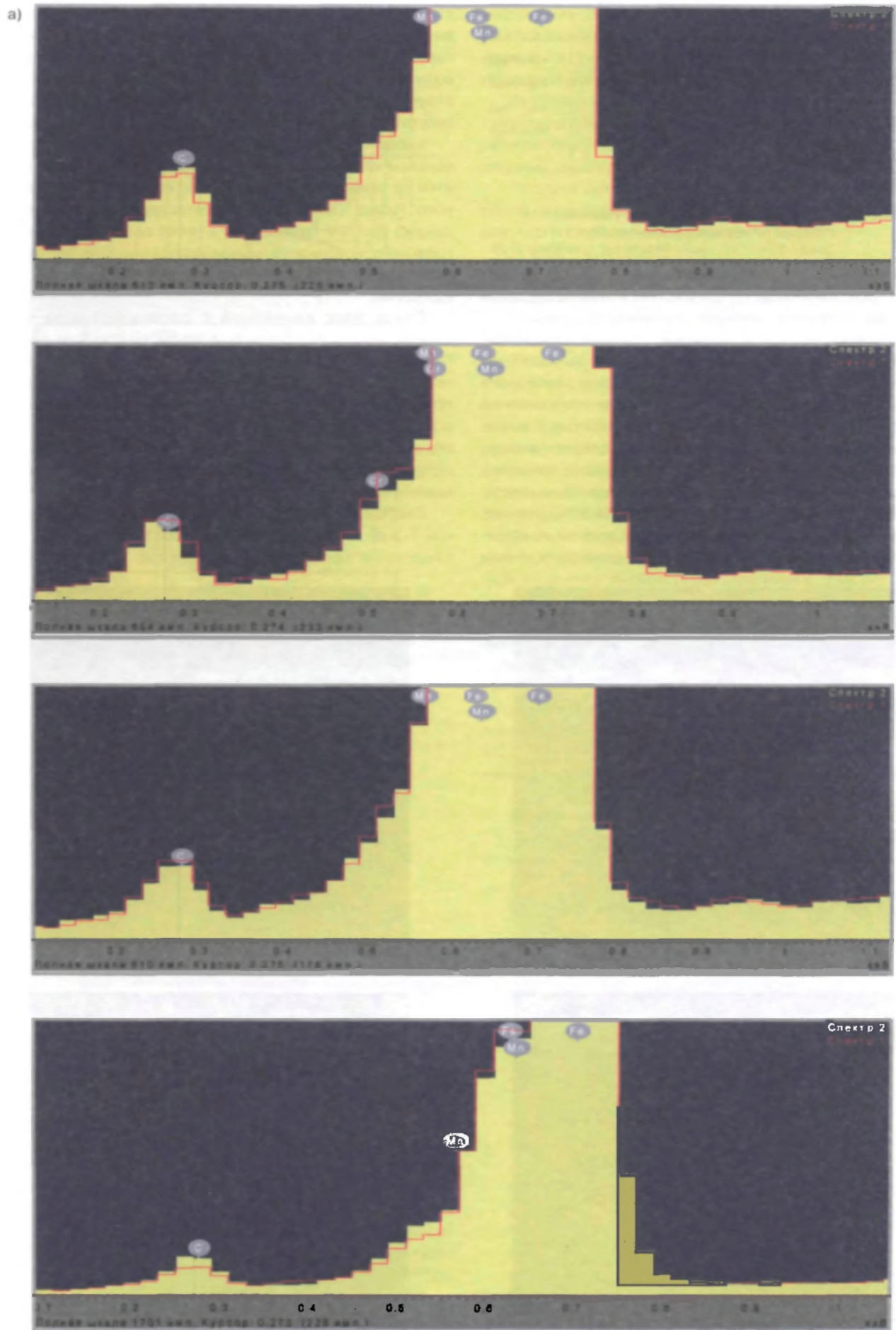


Рис. 10. Фрагменты спектрограмм 1 и 2 на участках 1–4 (а–г) образца № 65

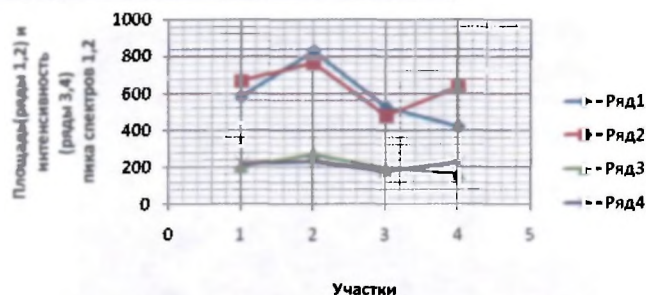


Рис. 11. Распределение углерода по участкам 1–4 сварного соединения образца № 65 (ряды 1(2), 3(4) — соответствуют спектрам 1, 2)

мом сварки, составом и толщиной основного металла (рис. 13а).

При сварке низкоуглеродистых горячекатаных (в состоянии поставки) сталей при толщине металла до 15 мм на режимах, обеспечивающих небольшие скорости охлаждения, структуры металла шва и околошовной зоны примерно такие, какие были рассмотрены выше. Повышение скоростей охлаждения при сварке на форсированных режимах металла повышенной толщины, а также однократных угловых швов при отрицательных температурах и т. д. может привести к появлению в металле шва и на участках перегрева полной и неполной рекристаллизации в околошовной зоне закалочных

структур. Повышение содержания в стали марганца увеличивает эту вероятность. При этих условиях при сварке горячекатаной низкоуглеродистой стали марки ВСтЗ возможно получение в сварном соединении закалочных структур. Изменение этих свойств зависит от погонной энергии, типа сварного соединения и условий сварки.

Характерной особенностью сварки стержней с начальной квазикомпозитной (слоистой) структурой является ее заметное изменение под воздействием сварочного тепла. Об этом свидетельствуют сопоставления данных рис. 1 и таблиц 1–3, а также сопоставление хода графиков изменения микротвердости для начальной структуры и структуры стержней в составе сварного соединения.

Связь этих изменений с распределением тепла сварки можно проследить и по литературным данным (см. рис. 13, [17]). Из рис. 13 следует, что наибольшая твердость металла соединения будет в зоне 3 (участок полной перекристаллизации), а наименьшая — в сварном шве и в зоне высокотемпературного отпуска. Примерно в таких же соотношениях находятся и временные сопротивления металла соответствующих участков соединения.

Сварочное тепло создало повторный нагрев участков 1–5 до температуры (100–1500) °С. В работе [11] исследовали при повторном нагреве до температуры

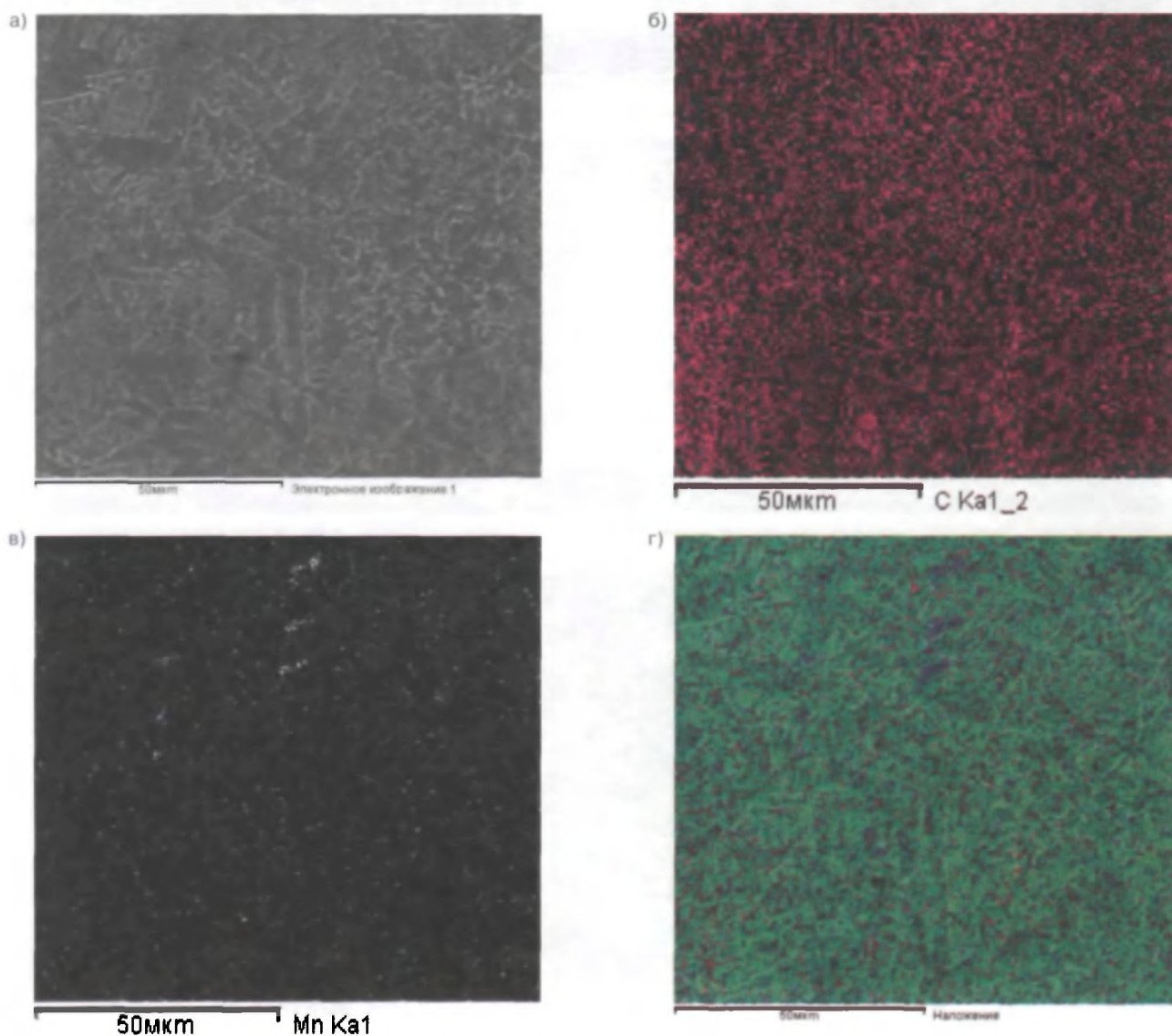
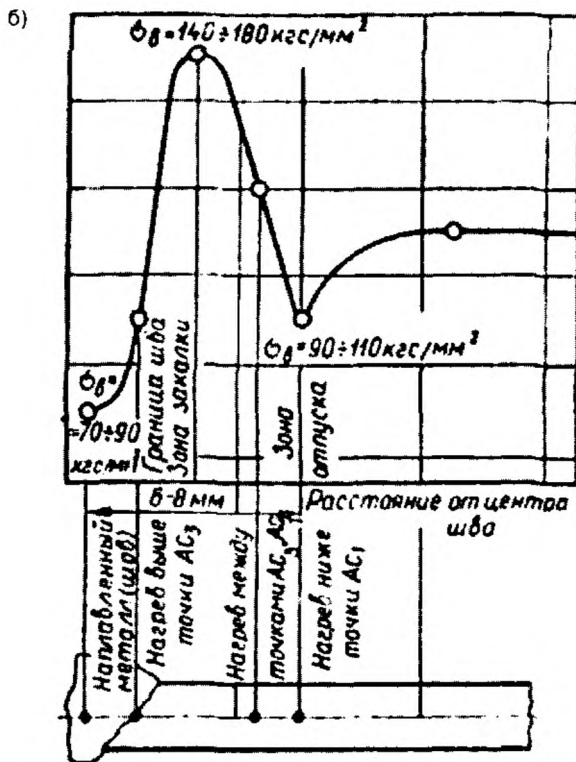
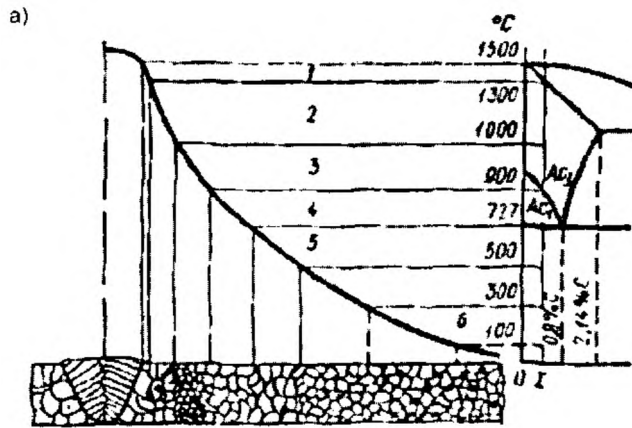


Рис. 12. Микроструктура участка 1 (а) образца № 65 и распределение на них углерода (б), марганца (в), железа (г)



- 1 — зона сплавления; 2 — участок перегрева;
3 — участок полной перекристаллизации;
4 — зона частичной перекристаллизации;
5 — зона высокотемпературного отпуска;
6 — зона низкотемпературного отпуска и механического влияния и зона теплового воздействия и изменения твердости

Рис. 13. Схема строения сварного соединения при сварке стыкового шва (а) и дуговой сварке стали 30ХГСА (б) [17]

650 °C с выдержкой 10 минут арматурные стержни класса S500 (диаметр 25 мм, сталь 25Г2С) поточного производства ОАО "АрселорМиттал Кривой Рог". При этом методами электронной микроскопии выявлены структурные зоны, образующиеся при термическом упрочнении стержневой арматуры и морфологические изменения в материале. Установлено [11], что изменениям в основном подвержены количественный и фазовый составы карбидных фаз. Эти изменения можно отнести к зонам 6–4 (см. рис. 13). Соответствующие процессы в зонах 1–3 должны быть более завершенными.

В соединениях с фланговыми швами наиболее ослабленными являются участки у концов накладок. Смещение равнодействующей сил сопротивления материала вследствие частичного разупрочнения со стороны сварочного шва приводит к изменению схемы дефор-

мирования стержня: от центрального растяжения-сжатия к внецентренному. Это может существенно проявиться в снижении сопротивления переменным нагрузкам и действию низких температур.

Результаты экспериментальных исследований структуры арматуры класса S500 после сварки приведены в работе [12]. В [13] исследована работа двух типов сварных нахлесточных соединений арматуры:

1) стыка арматурного стержня с односторонней боковой накладкой из стержня того же диаметра и материала, что и стыкуемая арматура;

2) узла с уменьшенными двусторонними накладками на растяжение с основной продольной арматурой Ø16, накладками Ø14 класса S500 по ДСТУ 3760:2006.

Сварка выполнялась вручную электродами марки УОНИИ 13/55, на постоянном токе обратной полярности, с односторонними многослойными протяженными швами, в шахматном порядке. Соединение первого типа работает на нормальную силу и изгибающий момент, а второго — только на нормальную силу. Разрушения соединений происходили в местах окончания фланговых швов. Испытания позволили авторам [13] сформулировать ряд требований к технологии сварки арматуры S500.

Из рассмотренных выше данных следует, что основным затруднением при сварке термоупрочненных арматурных сталей является разупрочнение участка околошовной зоны, подвергавшегося нагреву в интервале температур 400 °C–700 °C. Этот участок имеет более низкую прочность по сравнению со сварным соединением в целом. Чем больше погонная энергия сварки, тем шире зона разупрочнения. В связи с этим для термоупрочненного металла целесообразно применять маломощные режимы сварки (до 5000 кал/см), а также использовать способы сварки с минимальным теплоотводом в основной металл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Разрушающие напряжения рабочих стержней арматурных соединений существенно зависят от вида их деформаций. Механические воздействия на стержни (незначительные надрезы, насечки зубилом) не существенно сказываются на их временном сопротивлении при деформировании в условиях положительных температур. Наибольшее снижение прочности проявляют образцы со сварочными ожогами на поперечных ребрах и с односторонними накладками. Появление изгиба накладок приводит к значительному уменьшению разрушающих напряжений. При этом существенную роль играет величина зазора между стыкуемыми стержнями в соединениях.
- 2 Исследования макроструктуры поперечных и продольных сечений сварных соединений арматурных стержней и распределения микротвердости по участкам сварных соединений показали, что после сварки в сечениях происходит значительное изменение первоначального слоистого структурного строения и прочностных характеристик слоев.
- 3 В сварном шве наблюдается повышенное содержание марганца. Меньшее содержание углерода в металле шва, по мнению автора, предупреждает образование структур закалочного характера при повышенных скоростях охлаждения, а снижение прочности металла шва из-за уменьшения

содержания углерода компенсируется легированием шва марганцем через сварочную проволоку.

4. В процессе сварки в заводских условиях в соединениях могут возникнуть отдельные дефекты. Так, электродуговая сварка в среде углекислого газа по недостаточно очищенным поверхностям приводит к возникновению пор в швах. Это свидетельствует о необходимости более тщательной отладки сварочного процесса. При разработке технологии сварки арматуры класса S500 с использованием накладок целесообразно учесть следующие, основанные на

опытах, рекомендации: начало сварного шва формировать на начале стыковой накладки; конец шва выводить на конец соединяемого стержня; для исключения перегрева применять электроды диаметром не более 2–3 мм, а для снижения сварочных напряжений выполнять сварку за несколько проходов; сварку термоупрочненной арматуры вести с предварительным подогревом с выполнением каждого последующего прохода при многослойном шве после остывания предыдущего шва до температуры не выше 100 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мадатян, С. А. Арматура железобетонных конструкций / С. А. Мадатян. — М.: Воентехлит, 2000. — 256 с.
2. Козлов, Э. В. Кривые течения, механизмы разрушения и размерный эффект малоуглеродистых низколегированных сталей с квазикомпозитной структурой / Э. В. Козлов, А. В. Плевков, А. Б. Юрьев, В. Е. Громов // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2002. — № 3. — С. 49–60.
3. Юрьев, А. Б. Структура термически упрочненной стержневой арматуры / А. Б. Юрьев [и др.] // Технология металлов. — 2005. — № 9. — С. 5–7.
4. Чинокалов, В. Я. Прочность структурных слоев в сечении термически упрочненной арматуры / В. Я. Чинокалов [и др.] // Технология металлов. — 2005. — № 10. — С. 15–18.
5. Большаков, В. И. Взаимосвязь структурной неоднородности термически упрочненной арматуры с изменением твердости по сечению стержней / В. И. Большаков [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр., вып. 36, ч. 1. — Днепродзержинск: ПГАСА, 2006. — С. 159–167.
6. Василевич, Ю. В. Макроструктуры арматурных стержней, упрочненных в потоке стана, и их сварных соединений / Ю. В. Василевич, Е. А. Мойсейчик, Е. К. Мойсейчик // Инновационные технологии в строительстве автомобильных дорог, мостов и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: матер. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. "Наука — образованию, производству, экономике", Минск, 17–18 декабря 2008 г. / БНТУ; редкол.: И. И. Леонович [и др.]. — Минск, 2008. — С. 326–332.
7. Стародубов, К. Ф. Термическое упрочнение проката / К. Ф. Стародубов, И. Г. Узлов, В. Я. Савенков. — М.: Металлургия, 1970. — 368 с.
8. Узлов, И. Г. Термическая обработка проката / И. Г. Узлов, В. Я. Савенков, С. Н. Поляков. — Киев: Техника, 1981. — 159 с.
9. Кукушкин, А. А. Высокопрочная арматурная сталь / А. А. Кукушкин [и др.]. — М.: Металлургия, 1986. — 272 с.
10. Натапов, А. С. Производство эффективных арматурных профилей для железобетона / А. С. Натапов, Л. Н. Левченко, С. Л. Баскин. — М.: Металлургия, 1992. — 208 с.
11. Большаков, В. И. Особенности изменения свойств по сечению термически упрочненной арматуры после повторного нагрева / В. И. Большаков [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2004. — № 3. — С. 71–74.
12. Мойсейчик, Е. А. Изменения макроструктуры арматурных стержней при технологических воздействиях / Е. А. Мойсейчик // Инновационные технологии в строительстве автомобильных дорог, мостов и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: матер. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. "Наука — образованию, производству, экономике", Минск, 17–18 декабря 2008 г. / БНТУ; редкол.: И. И. Леонович [и др.]. — Минск, 2008. — С. 279–281.
13. Ажермачев, Г. А. Сварные стыки продольной арматуры класса A500С в каркасах сейсмостойких зданий и сооружений / Г. А. Ажермачев, Э. М. Меннанов, А. З. Абдурахманов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. — 2009. — № 4(78). — С. 139–142.
14. Бродский, А. Я. Сварка арматуры железобетонных конструкций / А. Я. Бродский. — М.: Госстройиздат, 1961. — 379 с.
15. Дегтярев, И. Я. Сварка при изготовлении и монтаже арматурных конструкций / И. Я. Дегтярев. — М.-Л.: Энергия, 1965. — 240 с.
16. Гривняк, И. Свариваемость стали / И. Гривняк. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
17. Сварка в машиностроении: в 4-х т. Т. 1 / Н. А. Ольшанский (ред.) [и др.]; редкол.: Г. А. Николаев (пред.) [и др.]. — М.: Машиностроение, 1978. — 504 с.
18. Сборник научных трудов специалистов Белорусского металлургического завода, 2001–2008 гг.: в 3 т. Т. 3; редкол.: В. И. Грицаенко [и др.]. — Минск: Тэхналогія, 2009.
19. Моисеенко, В. И. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин / В. И. Моисеенко, П. Л. Мариев. — Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1999. — 200 с.

Статья поступила в редакцию 24.02.2010.