

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПРОЧНОСТИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

I. Введение

В конструкционном материаловедении различают две группы механических свойств материалов: 1) определяемые по результатам испытаний стандартных образцов в лаборатории, и 2) прочность этих же материалов в составе конструктивных элементов. Профессор Я.Б. Фридман [1] указывает причины вызывающие различие между прочностью материалов и деталей: 1) масштабный фактор, т.е. влияние различия в абсолютных размерах образцов и деталей; 2) концентрация напряжений (обычно неодинаковая у образцов и деталей); 3) различные градиенты напряжений; 4) наличие в деталях остаточных напряжений при отсутствии или ином распределении их у образцов; 5) различная анизотропия свойств в деталях и в образцах; 6) различные внешние среды, воздействующие на деталь и образец при их нагружении; 7) неодинаковая жесткость деталей и образцов, ведущая к различному запасу упругой энергии и темпу подвода энергии в процессе деформации и разрушения; 8) качество состояния поверхности у деталей и образцов; 9) различные режимы нагружения во времени.

Сочетание этих факторов в расчетных зависимостях для большинства реальных ситуаций при современном уровне знаний затруднительно, что предопределяет необходимость применения натуральных испытаний для определения расчетного сопротивления материалов в составе элементов конструкций. Указанные факторы, влияющие на прочность и деформацию детали под действием нагрузки, могут быть разделены на три группы [1]. Для первой группы определяющими являются свойства материала при данной скорости и температуре нагружения. До настоящего времени в большинстве случаев измеряемые механические характеристики обычно являются критическими и закритическими и потому определяются не только свойствами материала, но также и формой и размерами образца. Для второй группы существенна характеристика деталей или образца, форма и размеры которых в значительной мере определяют напряженное и деформированное состояние, податливость и скорость нагружения. Третья группа объединяет факторы, характеризующие условия нагружения: режим нагружения, в частности, условия закрепления, число повторений нагружения, температура и скорость, податливость нагружающей системы, внешняя среда (коррозионная, влажность, облучение и т.д.).

Характеристикой степени использования материала в конструкциях может служить отношение действительной несущей способности конструкции к несущей способности при полном использовании прочности материала для данного вида нагружения. У реальных конструкций и деталей это отношение обычно меньше 0,5, что указывает на возможное недоиспользование прочности материала в элементах конструкций.

В силу изложенного прочность материала в составе элемента конструкции выделяется и другими авторами [1-3] в особую категорию, наиболее часто именуемую как конструктивная (конструктивно-технологическая) прочность.

До недавнего времени для обычного железобетона в отечественном строительстве использовалась в основном стержневая арматура из стали классов А-I, А-II и А-III, требования к которым регламентируются ГОСТ 5781, и из стали классов А400С и А500С, нормируемых ГОСТ 10884, а также - холоднотянутая проволока периодического профиля диаметром 3-5 мм класса Вр-1 по ГОСТ 6727.

Технико-экономический анализ показал, что применение многих классов арматурной стали приводит к удорожанию строительства. Поэтому с 1991 года в европейской практике проявилась тенденция к замене многих классов арматуры периодического профиля на единый

класс свариваемой арматуры периодического профиля В500 с пределом текучести $\sigma_T > 500$ Н/мм² по стандарту EN 10080. Такая унифицированная арматура, имеет химический состав определяемый содержанием в стали углерода (не более 0,22%) и углеродным эквивалентом $C_{экв} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$ (не более 0,5). Арматурная сталь этого класса выпускается термомеханически упрочненной в потоке проката, горячекатаной с микролегированием или холоднодеформированной.

В производстве арматуры стран СНГ проявляется подобная ситуация. Современное производство арматурного проката характеризуется устойчивой тенденцией к снижению расхода дорогостоящих легирующих элементов при одновременном повышении прочностных параметров арматурных сталей за счет термического упрочнения с прокатного нагрева. Таким образом, из углеродистых сталей (в основном Ст3) получают арматуру более высокого, чем ранее, класса.

Получаемая при таком технологическом воздействии арматура относится к классу функционально-градиентных (слоистых) материалов, характерной особенностью которой является явно выраженное плавное изменение механических свойств, химического состава и др. характеристик по поперечному сечению стержня. В результате обработки прокат получает новые механические, технологические и другие свойства, влияние которых на изменение конструктивно-технологической прочности в значительной мере не исследовано.

II. Факторы, определяющие конструктивно-технологическую прочность арматуры

Свойства отечественных арматурных сталей, изделий из арматуры, поведение арматурных стержней при конструктивных, технологических и эксплуатационных воздействиях многосторонне исследованы и опубликованы в ряде работ [2, 4, 5-12].

Основным требованием к строительным в т.ч. к арматурным, сталям является наличие высокой конструктивно-технологической прочности, под которой понимают сопротивление стали при ее работе в элементах конструкций нагрузкам, имеющим место при эксплуатации сооружений статическим, ударным, циклическим, в том числе в условиях отрицательных климатических температур и естественных агрессивных сред.

Параметрами прочности являются не все механические характеристики стали, определенные по испытаниям стандартных образцов, а лишь те, что тесно коррелируют с конструктивно-технологической прочностью элементов арматуры в условиях эксплуатации.

Конструктивно-технологическая прочность обычной арматуры железобетонных конструкций экспериментально изучалась рядом авторов в связи с решением частных производственно-технологических задач [4, 6, 7-14]. Так, на примере арматурного горячекатаного проката из сталей Ст5, 18Г2С, 35ГС в работах [13, 14] экспериментально исследуется прочность и пластичность арматурных стержней в состоянии поставки, прочность сварных соединений и влияние на них различных конструктивно-технологических факторов, влияние геометрии периодического профиля на пластичность и прочность арматуры и др. По данным указанных работ можно выделить следующие группы факторов, определяющих конструктивно-технологическую прочность арматурного проката.

1. Геометрия профиля существенно сказывается на пластичности и прочности арматурного стержня. Она предопределяет напряженно-деформированное состояние поверхностной зоны арматуры. Так, для арматуры из сталей Ст5, 35ХГС отмечен рост разрывов винтовых выступов в сжатой зоне изгибаемого стержня вследствие особенностей напряженного состояния, уменьшении радиуса изгиба, понижении температуры. Отмечено [13, 14], что винтовые выступы исследованных стержней практически не участвуют в формировании сопротивления стержня внешним нагрузкам. Так, перерезание их сечения до основания выступа на строгальном станке и зубилом не приводила к изменению прочности и пластичности. Наиболее вредно и опасно влияние винтовых выступов на цилиндрическую часть стержня и продольно направленные выступы-ребра. Так, винт, изготовленный из пластичной стали Ст3, разрушается хрупко из-за появления радиальных растягивающих напряжений, вызываемых винтовой нарезкой (рис. 1).

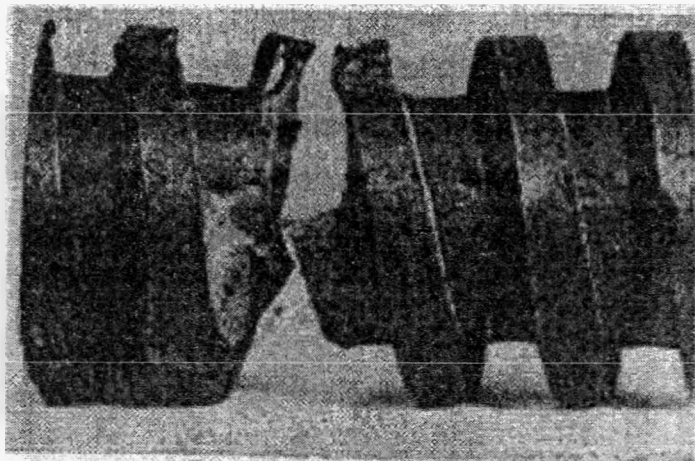


Рис. 1.

Винтовые выступы сказываются на состоянии и работе продольных ребер. Так, экспериментально подмечено [13], что винтовые выступы одной боковой полуповерхности, укорачиваясь, смещаются навстречу боковым выступам другой боковой полуповерхности и при этом они изгибают или сдвигают разграничивающие их продольные ребра.

2. Конструктивно-технологические надрезы (дефекты). На работе продольного ребра арматурного стержня сказывается наличие на нем дефектов (надрезы, подрезы, вмятины, и т.п. концентраторы напряжений).

Насечки на продольных ребрах приводят к хрупкому разрушению. Надрез продольного ребра стержня из стали 35ГС вызвал уменьшение в 6-7 раз относительного сужения образца при разрыве сравнительно с теми же характеристиками неповрежденного стержня (рис. 2).

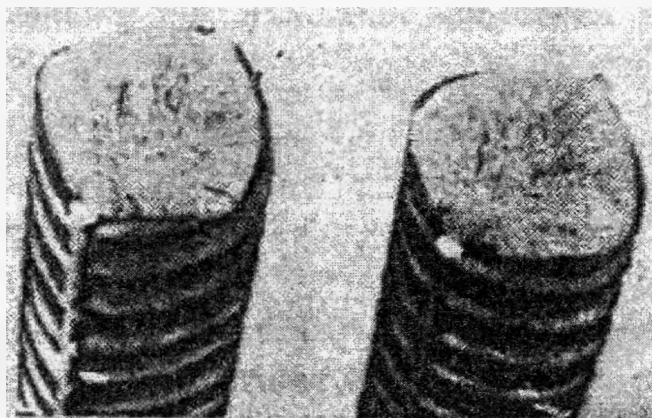


Рис. 2.

3. Сварочные воздействия. Местное воздействие сварки приводит к изменению структуры материала, вызывает снижение конструктивно-технологической прочности, снижает сопротивляемость хрупким разрушениям, переменным нагрузкам и воздействиям коррозионной среды. Сварные соединения, выполненные контактной сваркой, показали высокую прочность соединений и стабильность результатов испытаний. Разрушение происходит рядом со стыком, в местах подплавлений, надрезов и т.п. (рис.3). Стыки, выполненные ванной сваркой, с применением парных накладок разрушаются хрупко с очагом разрушения в местах концентраторов, надрезов и т.п. (рис.4). Существенно сказываются на прочности стыков, выполненных ванной сваркой, геометрические параметры соединения (зазоры между элементами, размеры формы и др.). Показано [13,14], что прочность соединений зависит от технологии сварки: наличия непроваров, наличия пор, состояния сварочных материалов и т.д. Стыки с накладками (рис. 5)

весьма чувствительны к изгибу, расположению накладок, соотношению площади накладок площади сечения соединяемого элемента.

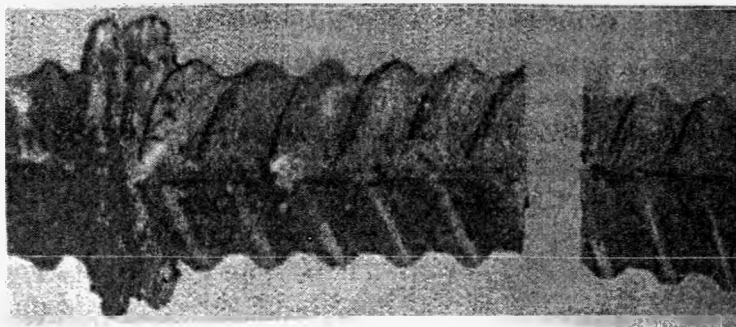


Рис.3.

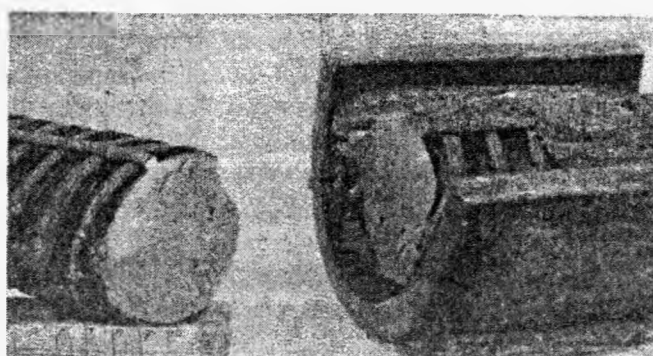


Рис.4.

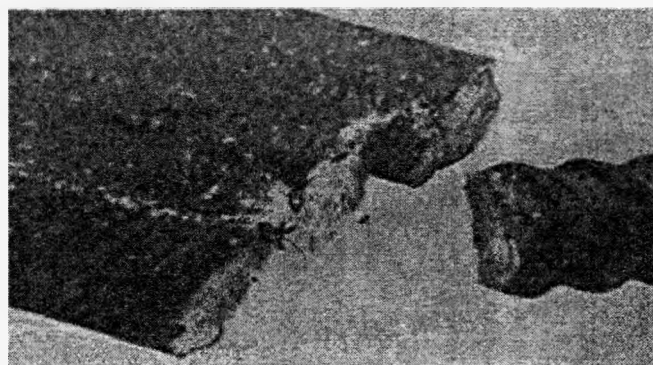


Рис.5.

Подплавление продольного ребра при контактно-стыковой сварке также приводит к хрупкому разрушению стержня.

Проведенные опыты позволили классифицировать [13,14] участки арматурного стержня по опасности конструктивно-технологических воздействий (рис.6): I- места неопасных воздействий; II-относительно возможные места повреждений и воздействий; III- места, в которых не рекомендуются технологические воздействия; IV- места, в которых конструктивно-технологические воздействия недопустимы.

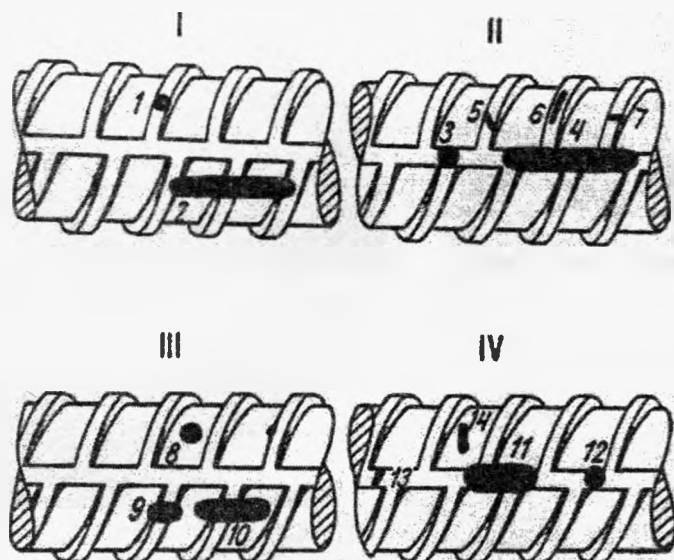


Рис.6.

III. Факторы, определяющие конструктивно-технологическую прочность функционально-градиентных (слоистых) арматурных стержней

При производстве функционально-градиентных (слоистых) арматурных стержней формирование требуемой структуры проката и свойств его составляющих, дислокационных субструктур происходит в процессе температурно-временных воздействий в линии прокатных станов [15-17]. В отдельных исследованиях [18,19] установлено, что в результате термообработки арматуры по режиму прерывистой закалки в сечении стержней образуется слоистая структура в виде различных структурных слоев. Микроструктура слоев в направлении от поверхности к осевой зоне изменяется. Слоистое строение таких арматурных стержней зависит от диаметра стержня [18]. С его увеличением от 12 до 22 мм растет и толщина упрочненных поверхностных слоев при сохранении структурных составов. Наличие в поперечном сечении арматурных стержней диаметром 16,20,22мм (материал арматуры- Ст3пс) и 40мм(сталь 18Г2С) структурной неоднородности подтверждают и исследования диаметрального распределения микротвердости. При этом максимальную твердость имеет приповерхностная часть арматурного стержня, а минимальную- центральный участок [18,19]. Исследования авторов подтвердили эту особенность и для арматурных профилей, используемых в Беларуси. Полученное макростроение стержней показано на рис.7 .

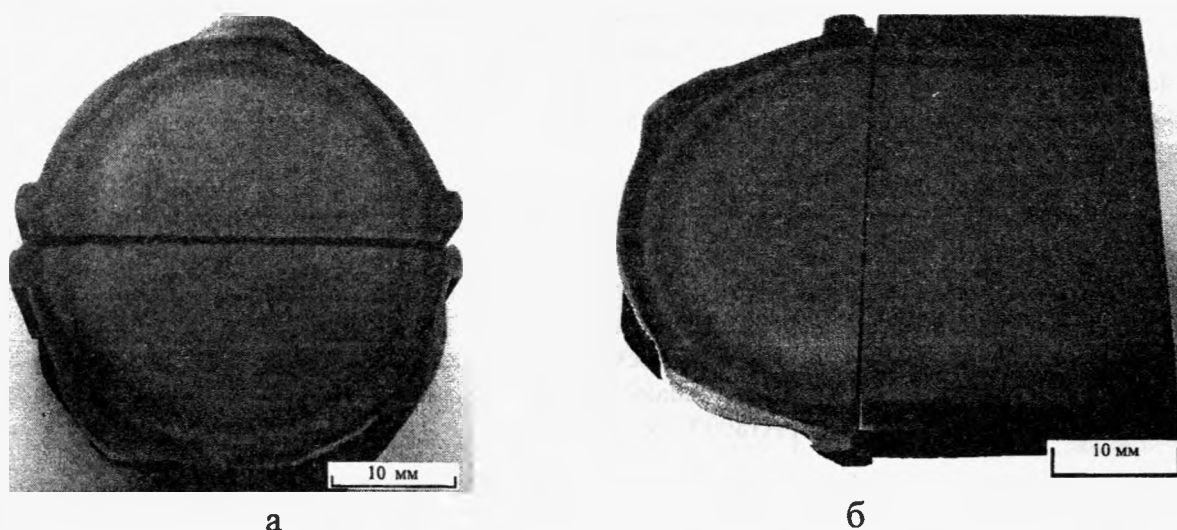
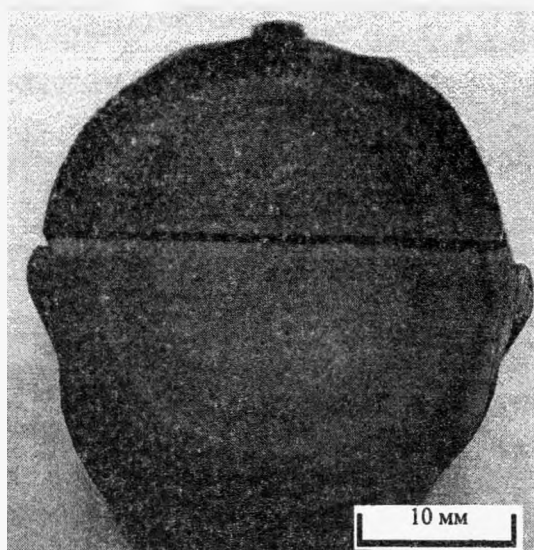
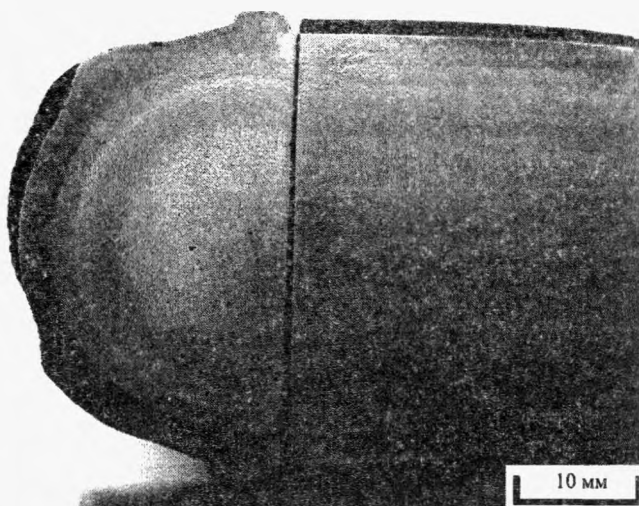


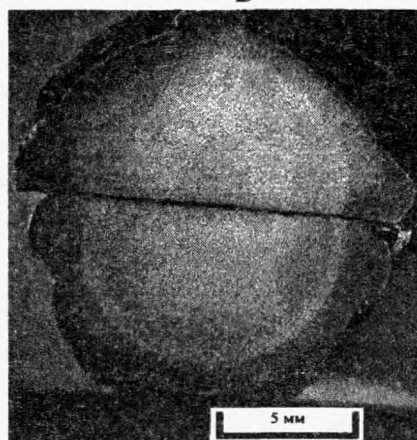
Рис. 7. Макроструктура арматуры: а,б - Ø32мм; в,г - Ø25мм; д,е - Ø12мм



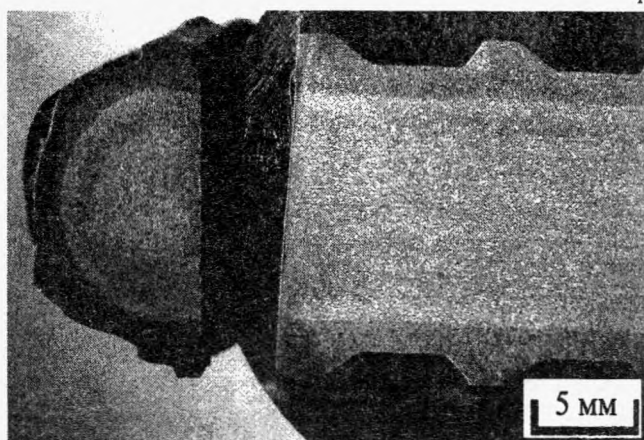
В



Г



Д



е

Окончание рис. 7

Приповерхностный слой таких стержней состоит из продуктов отпуска мартенсита, промежуточные слои - из отпущенного бейнита и феррита; срединный слой содержит вырожденный перлит и феррит с вкраплениями видманштеттового феррита при больших диаметрах стержней. Толщины приповерхностного и промежуточных слоев меньше изменяются с ростом диаметра стержня, чем осевого слоя. Измерения микротвердости в поперечных и продольных сечениях подтверждают наличие слоистого строения у исследованных арматурных стержней (рис.8). Эта закономерность подтверждается и микроструктурой различных участков арматурных стержней.

Разброс величин микротвердости (временного сопротивления) для различных слоев термомеханически упрочненного проката колеблется в пределах 130...275, а для горячекатаной арматуры соответствующий интервал составляет 160...245.

Комплексное исследование влияния технологических воздействий на прочностные характеристики функционально-градиентных арматурных сталей проведено в 2002-2005г.г. в РГСУ[21-23]. Взаимосвязь упругопластического деформирования одноосным растяжением и изменения механических свойств и условий вязкохрупкого перехода арматурных горячекатаных сталей классов А240, А400, Ат800 проанализирована и в работе [21].

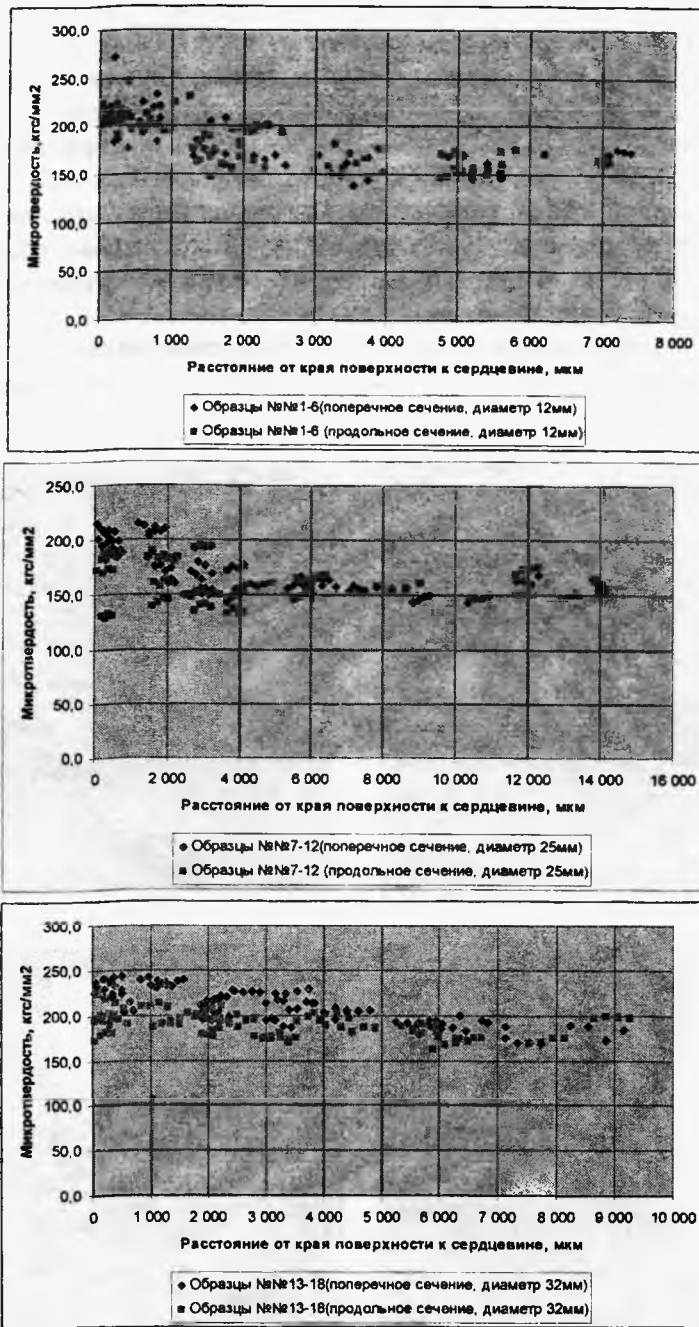


Рис.8. Распределение микротвердости по поперечному сечению арматурных стержней $\varnothing 12, 25, 32$ мм

Там же приводятся данные, показывающие влияние упругопластического деформирования при напряжении, превышающем предел текучести, на склонность горячекатаной арматуры к хрупкому разрушению. Получено [22], что горячекатаные арматурные стали классов А240, А400 не имеют прочностных резервов и при незначительном превышении рабочими напряжениями предела текучести проявляют склонность к хрупкому разрушению. Термомеханически упрочненная сталь класса Ат800 имеет более высокие прочностные характеристики. В работе [23] обобщены данные экспериментальных исследований арматурных сталей классов А500С, Ат800 при напряжениях, превышающих предел текучести, что показало возможность упрочнения этой арматуры одноосным растяжением выше предела текучести. Экспериментально исследована их склонность к хрупкому разрушению и определены предельно допустимые отрицательные температуры их безопасной эксплуатации (для стали А500С- $[T]_{\min} = -43^{\circ}\text{C}$ (в состоянии поставки) и) $[T]_{\min} = -30^{\circ}\text{C}$ (в состоянии упрочнения). Показано, что при резком

нагреве от (-43)оС до 300...350 оС и последующем продолжительном охлаждении снижается твердость поверхностного слоя арматурных стержней (для А500С-на 20%, для Ат800- на 8%).

Экспериментальное исследование эксплуатационных характеристик арматурной стали класса А500С проводили в НИИЖБ, ЦНИИСК, Моспромжелезобетон. При этом установлено, что механические характеристики такой арматуры соответствуют требованиям СТО ВСЧМ 7-93 и ТУ 14-1-5393-200.

Приведенные исследования функционально-градиентных арматурных сталей недостаточны для оценки конструктивно-технологической прочности сварных соединений с использованием таких стержней. На изменение конструктивно-технологической прочности таких стержней существенно сказывается их начальная слоистость.

Наши исследования выявили значительное изменение макроструктуры в поперечных сечениях слоистых стержней в сварных соединениях арматурных стержней. Пример таких изменений показан на рис.9.

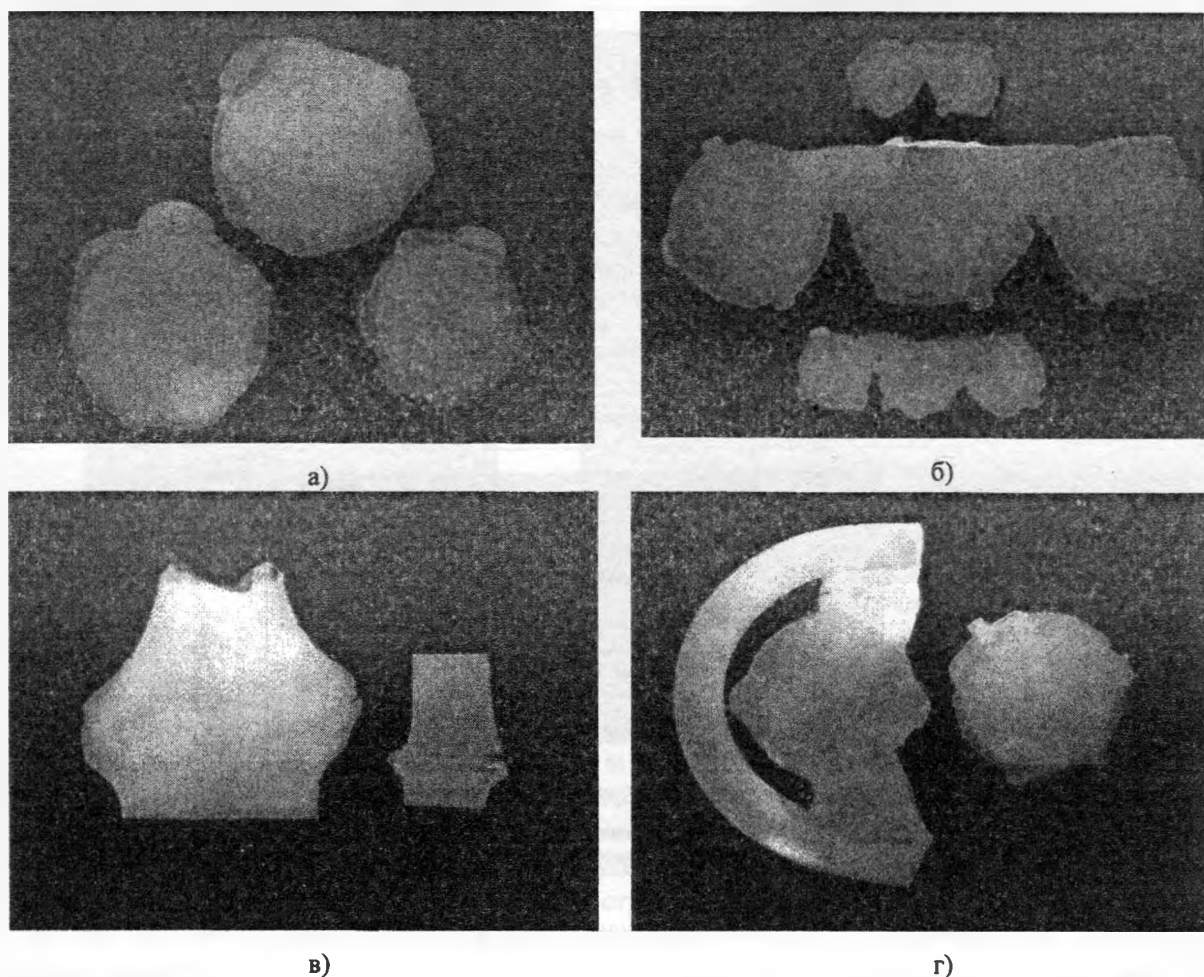


Рис. 9. Образцы для исследований изменений макроструктуры арматуры после тепловых воздействий: а) при наплавке; б) при сварке фланговыми швами; в) при контактной сварке; г) при ванной сварке

IV. Заключение

1. Данные экспериментов позволяют выделить на поверхности арматурного горячекатаного стержня 4 участка по опасности конструктивно-технологических воздействий: I- места неопасных воздействий; II-относительно возможные места повреждений и воздействий; III-места, в которых не рекомендуются технологические воздействия; IV- места, в которых конструктивно-технологические воздействия недопустимы (см.рис.2.2). Исследование конструктивной прочности арматурных изделий и их предельных состояний необходимо проводить с учетом указанных 4-х участков.

2. Прокат арматурный (по ТУ РБ 04778771.001-97, ГОСТ 5781-82) имеет слоистое строение с 5-ю соосно расположенными слоями, имеющими различные механические свойства, а арматурный стержень можно рассматривать как композитный стержень со слоистой структурой. Величины микротвердости слоев, измеренные в поперечных и продольных сечениях одного и того же стержня, отличаются между собой.

3. При проектировании изделий из исследованных арматурных стержней, у которых более прочные слои располагаются в приповерхностной зоне, и расчетах элементов конструкций с их использованием следует учитывать повышенную чувствительность таких стержней к надразам различной природы, изменения механических характеристик слоев при технологических и эксплуатационных температурных воздействиях, изменения прочности и деформативности в результате воздействия коррозионных сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. Изд. 3-е. В 2-х частях. Ч.2. Механические испытания. Конструкционная прочность. -М.:Машиностроение, 1974.-368с.
2. Бродский А.Я., Евстратов Т.И., Фридман А.М. Сварка арматуры железобетонных конструкций на строительной площадке.-М.:Стройиздат, 1978.-193с.
3. Кишкин Б.П. Конструкционная прочность материалов.-М.: Изд-во МГУ,1967.-184с.
4. С.А.Мадатян. Арматура железобетонных конструкций.-М.:2000.-256с.
5. Мурашев В.И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона.-М.:Строймашиздат, 1960.
6. Соколовский П.И. Арматурные стали.-М.:Металлургия,1964.-207с.
7. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций.- М.:Стройиздат,1974.-232с.
8. Аваков А.И. Холодносплюснутая арматура периодического профиля для железобетона.-М.: Госстройиздат,1954.
9. Иванов А.И. Холодносплюснутая арматура периодического профиля для железобетона.-М.: Госстройиздат,1954.
10. Бродский А.Я. Сварка арматурной стали.-М.:Госстройиздат, 1961.
11. Высокопрочная арматурная сталь/Кугушин А.А., Узлов И.Г., Калмыков В.В. и др.-М.:Металлургия,1986.-271с.
12. Скоробогатов С.М. Основы теории расчета выносливости стержневой арматуры железобетонных конструкций.-М.: Стройиздат, 1976.-108с.
13. Дулькин В.Я. Конструктивная прочность стержневой арматуры железобетона.-Петрозаводск: Карельское книжное издательство,1967.-63.
14. Дулькин В.Я., Луговская Н.А., Конькова А.А., Мехилиянен Л.С. Экспериментальное исследование прочности и пластичности горячекатаной арматуры периодического профиля// Строительство и архитектура, 1966, №9, с.10-17.
15. Мадатян С.А. Сталь класса А500С для нового поколения арматуры железобетонных конструкций// Национальная металлургия.-2002, №4.
16. Натапов А.С., Левченко Л.Н., Баскин С.Л. Производство эффективных арматурных профилей для железобетона.-М.:Металлургия,1992.-208с.
17. Айзатулов Р.С., Черненко В.Т., Мадатян С.А. и др. Освоение массового производства арматурной стали повышенной надежности класса А400С для железобетона// Сталь. 1998. №6. С.53-58.
18. Юрьев А.Б., Чинокалов В.Я., Ефимов О.Ю., Мыскова Н.В., Прокофьева О.С. Структура термически упрочненной стержневой арматуры// Технология металлов.-2005, №9.-с.5-7.
19. Чинокалов В.Я., Юрьев А.Б., Ефимов О.Ю., Михаленко И.А., Мыскова Н.В. Прочность структурных слоев в сечении термически упрочненной арматуры// Технология металлов.-2005, №10.-с.15-18.