

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ КЛАССА А500С

Асп. ЯЗНЕВИЧ А. М.

Белорусский национальный технический университет

До недавнего времени для обычного железобетона использовалась стержневая арматура из стали классов А-I, А-II и А-III, требования к которым регламентирует ГОСТ 5781, и из стали классов А400С и А500С (ГОСТ 10884). Такое разнообразие видов арматурной стали существенно усложняло работу строителей, и поэтому постепенно от арматуры класса А-II отказались, оставив только «северную» арматуру Ас-II. Основным и фактически единственным видом горячекатаной арматуры периодического профиля оставили арматуру класса А-III (А400) из сталей 35ГС и 25Г2С.

Постепенно возникла необходимость применения в ненапрягаемых конструкциях унифицированной свариваемой арматуры класса А500С из низкоуглеродистых сталей (содержание углерода – менее 0,22 %), что предопределилось следующими основными причинами:

- во-первых, горячекатаная арматура класса А400 (А-III) марки 35ГС, а в ряде случаев и марки 25Г2С после дуговой сварки становится склонной к хрупким разрушениям. В результате большинство аварий железобетонных конструкций в процессе их монтажа происходило и происходит ныне из-за дуговой сварки, особенно «прихваток» данной арматуры. По международным нормам, сталь с углеродом 0,3 % и более не допускается сваривать. Поэтому первой и главной причиной перехода на арматуру класса А500С является безопасность людей и сооружений;

- во-вторых, переход на сталь класса А500С позволяет экономить в строительстве не менее 10 % арматуры, так как ее расчетное сопротивление на растяжение и сжатие $R_s = 450 \text{ Н/мм}^2$ на 23 % больше, чем расчетное сопротивление, равное 365 Н/мм^2 у стали класса А400;

- в-третьих, термомеханическое упрочнение низкоуглеродистых сталей обеспечивает получение стали с уникальной структурой естественного композита, которая, наряду с высокой прочностью, дает большую локальную пла-

стичность и исключает возможность хрупких разрушений сварных соединений.

Замена арматуры класса А400 (А-III) на арматуру класса А500С в монолитном и сборном железобетонном строительстве обеспечивает снижение металлоемкости в среднем на 10 % при ее максимальном уменьшении в сжатых элементах до 25 %.

Среди крупных металлургических предприятий России и стран СНГ, которые изготавливают сертифицированную сталь класса А500С, можно выделить Западно-Сибирский металлургический комбинат (ОАО «ЗСМК»), БМЗ, «Криворожсталь» и «Северсталь» (г. Череповец).

В связи со сложными технологией производства арматуры и ее структурными свойствами возникла необходимость в исследовании арматуры для прогнозирования ее прочности на этапе производства и эксплуатации.

В ОАО «ЗСМК» была исследована структура термически упрочненной на класс А500С арматуры из стали марки СтЗпс диаметром 12; 16; 20 и 22 мм. Обеспечение высоких прочностных свойств достигается быстрым охлаждением арматуры в потоке сортовых станов 250 на специальной установке термического упрочнения. Установлено, что в результате термического упрочнения по режиму прерывистой закалки арматуры в сечении стержня формируется градиентная структура в виде пяти соосно расположенных структурных слоев [1]. Выделенные при исследовании слои называются поверхностным, переходным и осевым (рис. 1).

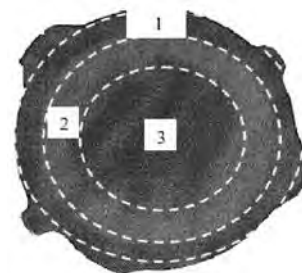


Рис. 1. Зонное строение арматурного стержня (металлография травленого шлифа): 1 – поверхностный; 2 – переходный; 3 – осевой слои

Микроструктура поверхностного слоя состоит из продуктов отпуска мартенсита, первого переходного слоя из отпущенного бейнита и зеренного феррита, второго переходного – из отпущенного бейнита и феррита, третий имеет более отпущенную по сравнению со вторым слоем структуру бейнита и феррита (рис. 2). В центре сечения арматуры формируются бейнит (вырожденный перлит) глобулярной морфологии, а также феррит в виде зерен, внутри которого наблюдаются выделения цементита [1].

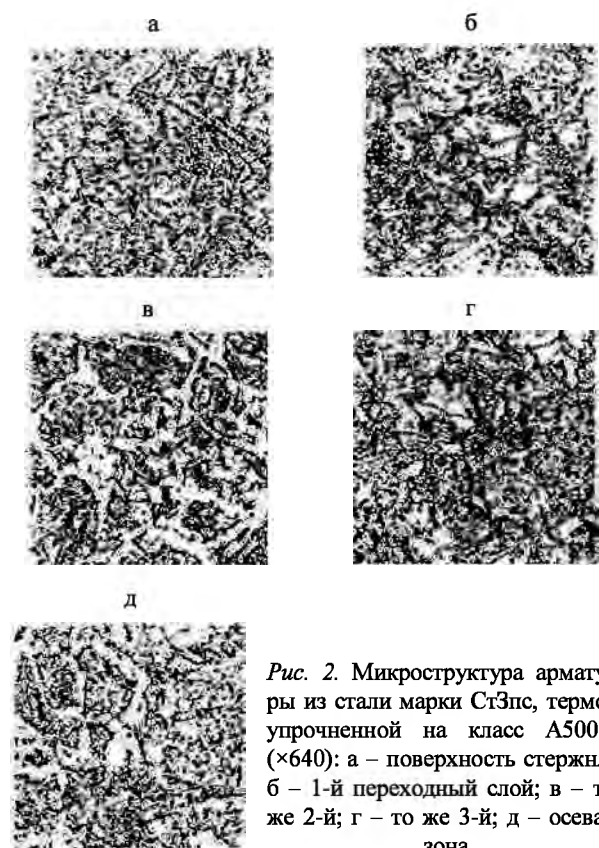


Рис. 2. Микроструктура арматуры из стали марки СтЗпс, термоупрочненной на класс А500С (×640): а – поверхность стержня; б – 1-й переходный слой; в – то же 2-й; г – то же 3-й; д – осевая зона

С повышением диаметра стержня (12; 16; 20; 22 мм) увеличивается толщина упрочненных поверхностных слоев (табл. 1).

Таблица 1
Толщина структурных слоев арматуры из стали СтЗпс

Профиль	Средняя глубина слоев, мм			
	Поверхностный	Переходные		
		1-й	2-й	3-й
№ 12	0,9	0,6	0,7	1,3
№ 16	1,3	0,8	1,0	1,4
№ 20	1,5	0,8	1,2	1,4
№ 22	1,8	1,1	1,2	1,4

Чтобы оценить вклад отдельных структурных слоев в общий уровень прочности арматуры, в ОАО «ЗСМК» были проведены испытания на растяжение упрочненной на класс А500С арматуры диаметром 40 мм из стали 18Г2С. Технология производства стержневой арматуры диаметром 40 мм включает в себя термическое упрочнение в линии прокатки по режиму прерывистой закалки в условиях стана 450 [2].

Испытания на растяжение арматуры проводили в исходном состоянии и после механического удаления ребер жесткости, поверхностного и переходного структурного слоев. С целью исключения температурного и деформационного воздействий на структуру стали обработка поверхности стержней проводилась при малых оборотах токарного станка и интенсивном охлаждении зоны реза. Каждый структурный слой снимался постепенно в несколько этапов (табл. 2).

Таблица 2
Механические свойства стержня после удаления слоев

Состояние образца	Диаметр, мм	Механические свойства		Площадь поперечного сечения, мм ²
		$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	
Арматура с ребрами жесткости	40	660	540	1265
После удаления ребер	40	656	540	1256
После снятия поверхностного слоя	34	600	480	905,5
После снятия переходного слоя	25	544	430	490,6

Прочностные характеристики отдельных структурных слоев определяли исходя из экспериментально подтвержденного условия, что усилие разрыва целого стержня равно сумме усилий разрыва отдельных слоев: $P_{уд} = P_{исх} - P_{ост}$, где $P_{уд}$ – усилие разрыва удаленного (исследуемого) структурного слоя; $P_{исх}$ – то же исходного (до удаления структурного слоя) стержня; $P_{ост}$ – то же оставшегося (после удаления структурного слоя) стержня. Зависимость между деформационными характеристиками слоев можно определить из диаграммы растяжения $\sigma(\epsilon)$ (рис. 3).

Существенный вклад в упрочнение вносят закалочные структуры – временное сопротивление поверхностного слоя в 1,5 раза выше, чем сопротивление осевой зоны (табл. 3).

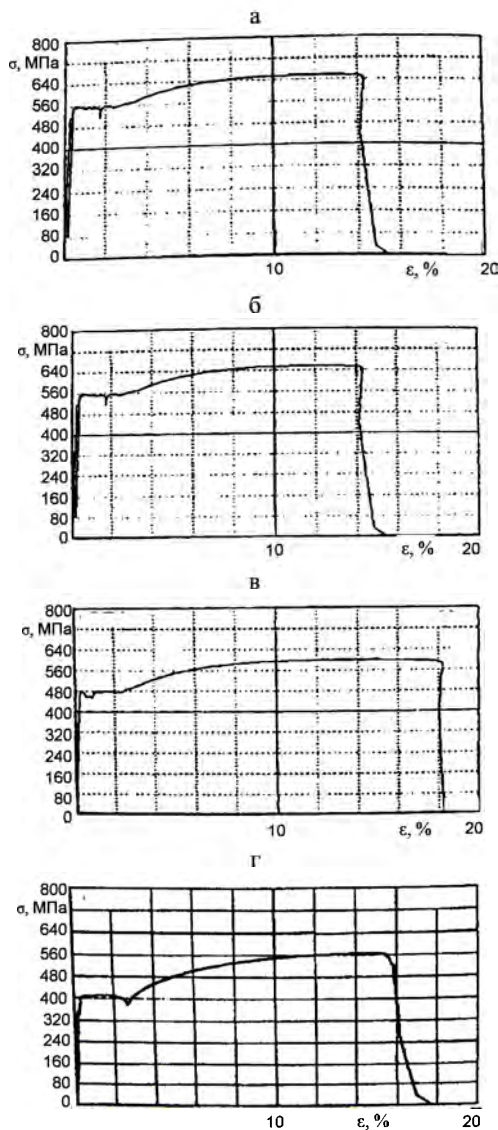


Рис. 3. Диаграммы деформации при растяжении: а – целого стержня; б – после удаления ребер жесткости; в – то же поверхностного слоя; г – то же переходного слоя

Таблица 3
Прочностные характеристики структурных слоев

Структурный слой	σ_t , МПа	σ_b , МПа
Поверхностный	801,8	624,2
Переходный	665,9	515,8
Осевая зона	544	430

Для упрощения методики оценки прочности структурных слоев предлагается в качестве исходных расчетных данных использовать результаты измерения твердости [3]. Пробы для изготовления заготовок отбирались из партий стержневой арматуры производства РУП «БМЗ» (табл. 4) в ОАО «Завод сборного железобетона № 1» (г. Минск), из которых затем вырезали 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 (свидетельство о поверке от 01.03.2006) с нагрузкой на призму 100 г в соответствии с требованиями ГОСТ 9450–76.

Таблица 4
Характеристики арматурных стержней¹

Класс арматуры, марка стали	Ø, мм	Химический состав, %										Механические свойства	
		C*	Si*	Mn*	P**	S**	Cr*	Ni*	Cu*	As*	N ₂ **	σ_t , Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²
Ат500С	12	19	18	60	23	16	8	9	20	1	8	585,0	675,0
Ат500С	25	18	19	58	9	16	13	10	21	1	9	550,0	660,0

¹ Прокат арматурный и термомеханически упрочненный по ТУ РБ 04778771.001–97 производства РУП «БМЗ».

* Увеличенное в 100 раз.

** Увеличенное в 1000 раз.

Исследования показали, что в сечениях арматуры в процессе металлургической обработки формируется слоистый структурный состав. На шлифах из проката арматурного и термомеханически упрочненного по ТУ РБ 04778771.001–97 производства РУП «БМЗ» можно выделить до пяти различных по механическим свойствам соосно расположенных слоев (рис. 4).

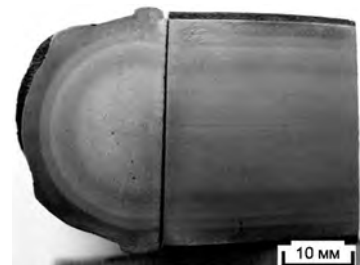


Рис. 4. Макроструктура арматуры Ø25 мм в совмещенных поперечном и продольном сечениях

Структурная неоднородность термически упрочненной арматуры подтверждается распределением микротвердости по сечению стержней, в профиле которого также можно выделить пять участков (табл. 5).

Разброс величин микротвердости (временного сопротивления) для различных слоев термомеханически упрочненного проката колеблется в пределах (130–275)HV (440–930 МПа) (рис. 5). На основании экспериментальных данных (табл. 5) можно установить зависимость между пределом прочности и микротвердостью по Виккерсу $\sigma_b = 3,4HV$.

Изменения микротвердости и временного сопротивления слоев арматурных стержней

Диаметр стержня, мм	Интервалы изменения микротвердости по Виккерсу и временного сопротивления слоев стержней (слои отсчитываются от поверхности к сердцевине)									
	1-й слой		2-й слой		3-й слой		4-й слой		5-й слой	
	HV	σ_b , МПа	HV	σ_b , МПа	HV	σ_b , МПа	HV	σ_b , МПа	HV	σ_b , МПа
12	200–275	680–930	187–225	630–760	160–210	540–710	155–200	530–680	140–160	480–540
25	185–215	630–730	150–215	510–730	135–190	460–650	140–160	480–540	130–160	440–540

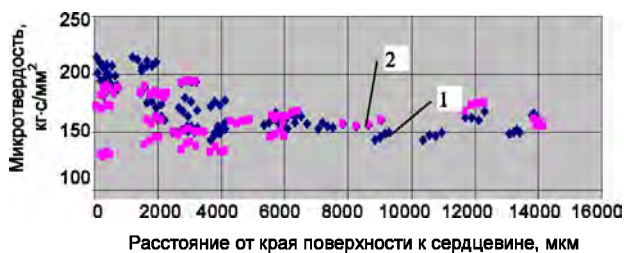


Рис. 5. Распределение микротвердости по сечению арматурных стержней Ø 25 мм: 1 – поперечное сечение; 2 – продольное

Полученные величины микротвердости могут быть использованы для предварительного определения соотношений между величинами механических характеристик металлов [4], например в случае анизотропии их свойств. Действительно, обозначая твердости, соответствующие пределу текучести металла σ_T и временному сопротивлению σ_b , распределение микротвердости по поперечному сечению арматурных стержней Ø12,25 мм через H_T и H_b , зависимости между соответствующими величинами можно представить следующим образом:

$$\sigma_T = k_T H_T; \quad \sigma_b = k_b H_b. \quad (1)$$

Из соотношений (1) следует искомая зависимость

$$\sigma_T / \sigma_b = (k_T / k_b) (H_T / H_b). \quad (2)$$

В (2) отношение k_T / k_b незначительно отличается от единицы, что вытекает из результатов определения механических свойств сталей различных классов и марок [4] методом вдавливания и методом растяжения. При записи выражений (1) и (2) принято допущение о сохранении отношения H_T / H_b при определении твердости различными методами [5].

ВЫВОДЫ

1. Прокат термически упрочненной на класс А500С арматуры из стали марки СтЗпс диаметрами 12; 16; 20; 22 мм и из стали 18Г2С

ОАО «ЗСМК» диаметром 40 мм имеет слоистое строение с пятью соосно расположенными слоями, имеющими различные механические свойства. Число соосно расположенных слоев в термомеханически упрочненном арматурном прокате по ТУ РБ 04778771.001–97 производства РУП «БМЗ» также не превышает пяти.

2. Максимальную твердость имеет приповерхностная часть арматурного стержня, а минимальную – центральный участок. С увеличением диаметра растет толщина упрочненных поверхностных слоев при сохранении структурных составов.

3. Отношение предела прочности отдельных слоев и значений распределения микротвердости выражается зависимостью $\sigma_b = 3,4H_V$ (табл. 5).

4. При проектировании изделий из исследованных арматурных стержней, у которых более прочные слои располагаются в приповерхностной зоне, необходимо учитывать чувствительность таких стержней к изменениям механических характеристик слоев при технологических, эксплуатационных, температурных, коррозионных воздействиях. При моделировании и расчетах арматурный стержень следует принимать как неоднородный с различными механическими свойствами для каждого слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Структура термически упрочненной стержневой арматуры / А. Б. Юрьев [и др.] // Технология металлов. – 2005. – № 9. – С. 5–7.
2. Прочность структурных слоев в сечении термически упрочненной арматуры / В. Я. Чинокалов [и др.] // Технология металлов. – 2005. – № 10. – С. 15–18.
3. Мойсейчик, Е. А. Макроструктура арматурных стержней / Е. А. Мойсейчик // Машиностроение. – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 353–358.
4. Марковец, М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – М.: Машиностроение, 1979. – 179 с.
5. Моделирование работы на растяжение стальной арматуры класса S500 с конструктивно-технологическими дефектами с использованием комплекса Ansys / Ю. В. Василевич [и др.] // Проблемы современного бетона и железобетона. – Минск, 2009. – Ч. 1. – С. 176–186.

Поступила 29.12.2009