

# ЭФФЕКТИВНАЯ АРМАТУРА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ВЯЧЕСЛАВ ТЕРИН

До середины 1950-х гг. в СССР основным видом арматуры железобетонных конструкций была гладкая горячекатаная сталь марок Ст0 и Ст3 с пределом текучести 240 МПа. В 1960-е гг. большое внимание было уделено повышению прочностных характеристик арматуры за счет изменения химического состава стали (введением различных легирующих добавок и повышением содержания углерода), упрочнения в холодном состоянии и термической обработкой. Были разработаны новые виды арматуры с периодическим профилем, что обеспечивало их надежную совместную работу с бетоном.

Начиная с 1961 г. и до середины 1990-х гг. в СНГ основным видом была горячекатаная арматура класса А-III (А400), выпускаемая в основном из низколегированной стали марки 35ГС.

Опыт развитых стран свидетельствует, что основные тенденции совершенствования арматуры железобетонных конструкций связаны с повышением прочностных характеристик и эксплуатационной надежности.

В последние годы в связи с высокой стоимостью стального проката особую актуальность приобретает задача снижения металлоемкости железобетона. Одним из путей решения этой проблемы является применение арматуры повышенной прочности с нормативным пределом текучести 500–600 МПа [1, 2].

Увеличения прочностных характеристик арматуры можно добиться двумя путями: легированием стали, т. е. введением в нее таких элементов, как марганец (Mn), кремний (Si), хром (Cr) и др., а также упрочняющей обработкой.

Прочность горячекатаной арматуры практически полностью зависит от химического состава стали. Значение временного сопротивления при этом может быть вычислено по известной зависимости [3]:

$$\sigma_u \text{ (МПа)} = 280 + 600(\%C) + 80(\%Mn) + 170(\%Si).$$

Химический состав наиболее распространенных марок арматурных сталей и их механические свойства приведены в таблице.

Для горячекатаной арматуры характерна однородная по сечению стержня ферритно-перлитная структура металла и высокое отношение временного сопротивления к пределу текучести  $\sigma_u / \sigma_y = 1,5\text{--}1,6$ .

Повышение прочностных характеристик горячекатаной арматуры до уровня нормативного предела текучести 600 МПа связано с необходимостью легирования дорогостоящими элементами, такими, как хром, титан, цирконий. В 1960-е гг. в СССР было освоено производство арматуры А-IV (А600) из марок сталей 30ХГ2С, 20ХГ2Т и 20ХГ2Ц, однако массовой она не стала из-за высокой стоимости.

Другим существенным недостатком горячекатаной арматуры из легированных марок сталей является склонность к «охрупчиванию» при сварке. Известно множество методов определения характеристик сварных соединений [4]. Контроль качества крестообразных сварных соединений арматуры в дополнение к стандартным испытаниям по ГОСТ 10922-90 достаточно просто осуществить путем изгиба стержня со сварным швом на растягивающейся стороне. Такая методика позволила установить, что для горячекатаной арматуры из стали 35ГС с максимальным содержанием углерода крестообразное сварное соединение,

выполненное дуговой сваркой прихватками и контактной точечной сваркой, выдерживает загиб лишь на угол 5–10° с последующим хрупким разрушением. Металлографические исследования структуры стали в зоне термического влияния сварки показали, что в зоне сварного шва образуются закалочные структуры игольчатого тростита с очень высокой микротвердостью  $H_{300} = 670 \text{ кг/мм}^2$ . Фрактограмма излома подтверждает хрупкий характер разрушения (рис. 1).

Анализ многочисленных аварий железобетонных конструкций, которые произошли из-за разрыва ненапрягаемой рабочей арматуры, подтвердил, что в подавляющем большинстве случаев имел место хрупкий характер разрушения в местах сварных соединений или ожогов стержней электросваркой.

Как показала практика развитых стран, наиболее эффективным и дешевым способом повышения прочностных характеристик арматуры является технология термомеханического упрочнения стали в потоке прокатного стана [5, 6]. Сущность данной технологии заключается в совмещении при прокатке следующих процессов: горячего деформирования, закалки и отпуска. Это выглядит следующим образом.

Из нагревательной печи стальные заготовки с температурой 1200 °С подаются на прокатный стан. Проходя последовательно через клетки стана и получив при этом высокую степень обжатия, стержни на скорости 10–20 м/с попадают в установку термоупрочнения в виде длинной трубы, где интенсивно охлаждаются водой, циркулирующей в установке под большим давлением – 1,0–2,0 МПа. Температура поверхности стержней при выходе из установки составляет 100–200 °С и при дальнейшем их перемещении к холодильнику происходит самоотпуск закаленного поверхностного слоя за счет внутреннего тепла.

Процессом термоупрочнения можно управлять, варьируя скорость прокатки и интенсивность охлаждения. В результате формируется композитная структура сечения с вязкой и прочной оболочкой из отпущенного мартенсита и менее прочной сердцевидной ферритно-перлитной структуры, более мелкозернистой, чем у горячекатаной стали. Благодаря использованию эффекта ВТМО (высокотемпературная термомеханическая обработка) достигаются принципиально новые свойства арматуры. При этом комплекс механических характеристик зависит как от химического состава стали, так и от степени термоупрочнения. Например, можно получить арматуру с одинаковым пределом текучести из различных марок стали, однако диаграммы деформирования будут существенно отличаться. Так, при  $\sigma_{02} = 520\text{--}580 \text{ МПа}$  для стержней диаметром 12 мм из легированной стали марки 25Г2С  $\sigma_u / \sigma_{02} = 1,35$ ; из углеродистых сталей марки Ст 5сп –  $\sigma_u / \sigma_{02} = 1,25$ ; марки Ст 3сп –  $\sigma_u / \sigma_{02} = 1,12$ .

При одинаковом химическом составе стали и одном уровне  $\sigma_{02}$  заметное влияние на отношение  $\sigma_u / \sigma_{02}$  оказывает масштабный фактор. Для арматуры из стали Ст 5сп при  $\sigma_{02} = 520\text{--}580 \text{ МПа}$  стержни диаметром 10 мм имеют  $\sigma_u / \sigma_{02} = 1,25$ , а диаметром 16 и 28 мм – соответственно 1,38 и 1,45. Зависимость  $\sigma_u / \sigma_{02}$  для термомеханически упрочненной арматуры из стали Ст 3сп достаточно точно описывается выражением:

$$\sigma_u / \sigma_{02} = 1,21 - 0,8095/d.$$

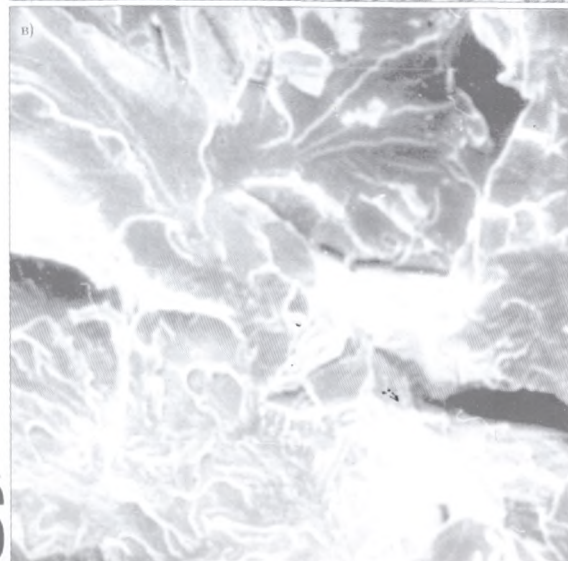
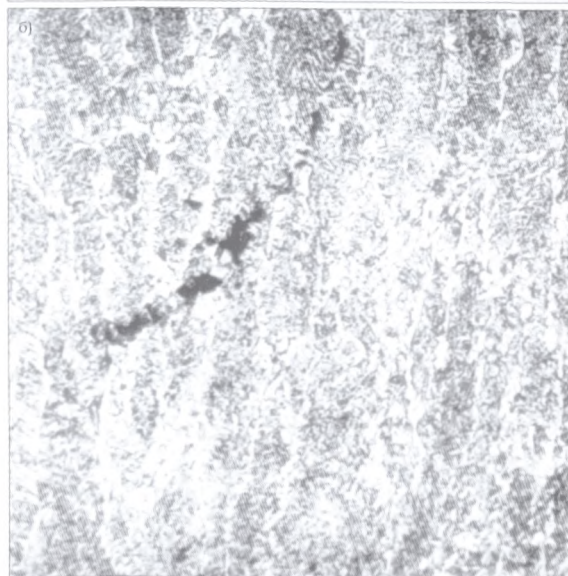
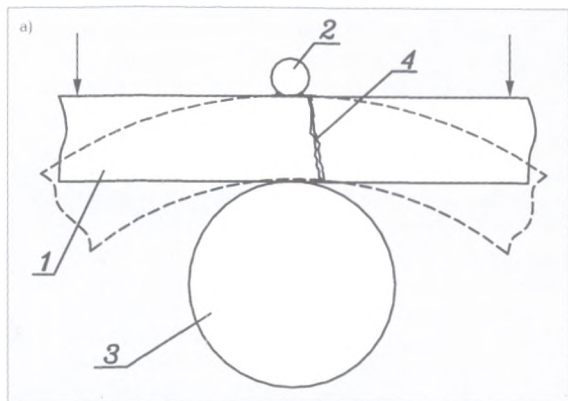
Марка стали	Содержание элементов, %			C <sub>экв</sub> *	Механические свойства**			
	C	Mn	Si		$\sigma_{yk}$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\sigma_{0.2} / \sigma_{yk}$
Ст 3сп	0,14–0,22	0,4–0,65	0,15–0,3	0,33	295	460	36	1,56
Ст 3сп	0,28–0,37	0,5–0,8	0,15–0,3	0,5	360	575	29	1,6
35ГС	0,3–0,37	0,8–1,2	0,6–0,9	0,57	430	670	25	1,56

\* - ЗНАЧЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ВЫЧИСЛЕНО ПО ФОРМУЛЕ  $C_{экв} = C + Mn/6 + Si/24$  ПРИ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЯХ УГЛЕРОДА И МАРГАНЦА.

\*\* - СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЯЧЕКАТАНОЙ АРМАТУРЫ ИЗ ПРИВЕДЕННЫХ МАРОК СТАЛЕЙ



РИС. 1. ИСПЫТАНИЕ КРЕСТООБРАЗНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ИЗГИБЕ:  
 А - СХЕМА ИСПЫТАНИЯ: 1 - ИЗГИБАЕМЫЙ СТЕРЖЕНЬ; 2 - ПРИВАРЕННЫЙ ПОПЕРЕЧНЫЙ СТЕРЖЕНЬ; 3 - ОПРАВКА ДИАМЕТРОМ 30; 4 - СЕЧЕНИЕ ХРУПКОГО ИЗЛОМА;  
 Б - СТРУКТУРА МЕТАЛЛА В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРКИ (X100); В - МИКРОФРАКТОГРАММА ПОВЕРХНОСТИ ХРУПКОГО ИЗЛОМА (X800).



Данное явление объясняется тем, что по сечению стержня имеется существенная неоднородность свойств стали, которая тем выше, чем больше степень упрочнения (рис. 2).

Используя технологию термомеханического упрочнения в потоке прокатного стана, на Белорусском металлургическом заводе освоено промышленное производство арматуры периодического профиля  $\varnothing 10-40$  мм класса Ат500С из углеродистой стали Ст 3сп. По комплексу механических и технологических свойств она полностью соответствует требованиям стандартов ISO/DIS 6935-2 и EN10080, первой среди заводов-производителей стран СНГ получила сертификаты соответствия в системах «ГОСТ РФ» и «Мосстройсертификация» и в больших объемах поставляется на экспорт.

Сварные соединения арматуры класса Ат500С из-за низкого содержания углерода и легирующих элементов отличаются пластичным характером разрушения. В зонах термического влияния сварки сталь имеет структуру сорбита с включением тростита, обладает невысокой микротвердостью ( $H_v \sim 290$  кгс/мм<sup>2</sup>) и не склонна к хрупкому разрушению. Это подтверждается испытаниями крестообразных сварных соединений, выполненных контактной точечной и дуговой сваркой прихватками и выдерживающими изгиб на 90° без изломов и трещин [7].

При соединении стержней диаметром 20–40 мм применяются виды сварки (например, ванная), характеризующиеся большими затратами тепла. В этом случае разупрочнение в зоне термического влияния может достигать значительных величин. Для создания равнопрочных соединений разработаны конструктивные решения с использованием несъемных стальных скоб-накладок [8].

Несмотря на большую изменчивость свойств термомеханически упрочненной арматуры по сравнению с горячекатаной, значения нормативного сопротивления для класса Ат 500С по всему сортаменту обеспечиваются с вероятностью большей, чем 0,975 ( $\bar{X} - 2S = 502$  МПа).

Для получения арматуры малых диаметров (3–5 мм) наиболее целесообразным и распространенным является упрочнение низкоуглеродистых сталей пластическим деформированием в холодном состоянии. Такой способ получения арматуры повышенной прочности самый старый и применялся в СССР с 1951 г.

Холоднодеформированную арматуру изготавливают по двум разным технологическим схемам: волочением либо прокаткой. Наибольшее распространение получила технология производства холоднотянутой проволоки классов В-1 и Вр-1 по ГОСТ 6727-80.

В дальнейшем в Беларуси были разработаны технические условия на опытную партию гладкой проволоки диаметром 3–5 мм класса В500 с нормативным пределом текучести 500 МПа. Анализ статистической изменчивости свойств показал, что значение нормативного сопротивления обеспечиваются с вероятностью большей, чем 0,975 ( $\bar{X} - 2S = 605$  МПа), при достаточной пластичности (значение относительного удлинения для диаметра превышают 3%). Диаграмма деформирования характеризуется низкими значениями  $\sigma_{yk} / \sigma_{0.2} = 1,05-1,1$  и параметра упругости в состоянии поставки  $\eta = \sigma_{0.05} / \sigma_{0.2} = 0,8$ . После правки величина  $\eta$  повышается до 0,9.

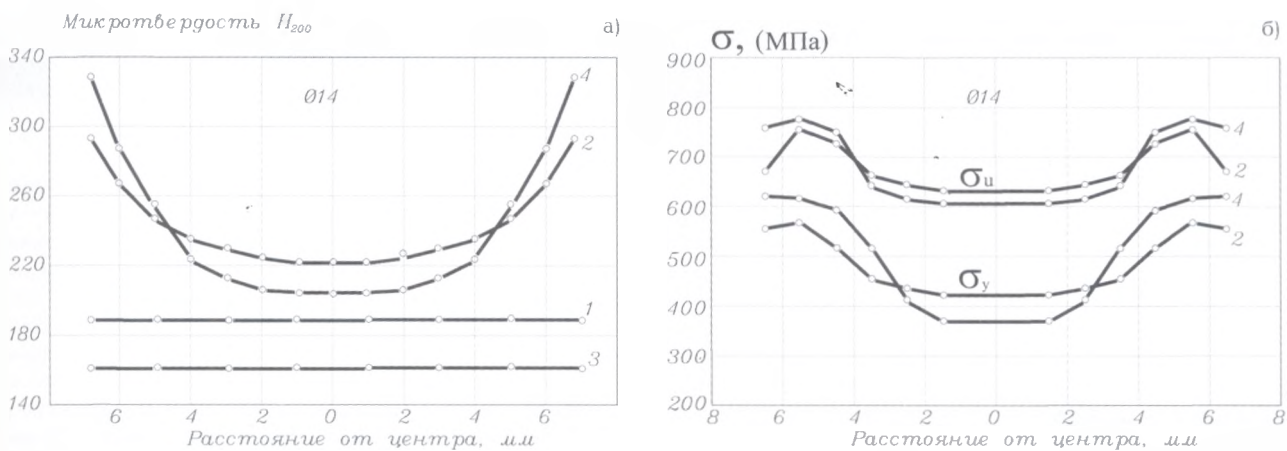


РИС. 2. ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ (А) И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК (Б) ПО СЕЧЕНИЮ СТЕРЖНЯ АРМАТУРЫ ДИАМЕТРОМ 14 ММ.  
 1 - Ст 500 ГОРЯЧЕКАТАНАЯ, 2 - Ст 500 ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИ УПРОЧНЕННАЯ,  
 3 - Ст 500 ГОРЯЧЕКАТАНАЯ, 4 - Ст 500 ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИ УПРОЧНЕННАЯ

Учитывая высокую обеспеченность нормативных сопротивлений, хорошую пластичность и свариваемость арматуры А500С и В500, в проект СНБ 5.03.01 внесен единый класс ненапрягаемой арматуры S500 (независимо от способа ее производства) с коэффициентом надежности  $\gamma_s = 1,1$ , величина расчетного сопротивления при этом составляет 450 МПа. Экспериментальные исследования прочности, трещиностойкости и деформативности изгибаемых железобетонных элементов показали, что для реальных диапазонов армирования рабочая арматура с нормативным пределом текучести 500 МПа может эффективно использоваться, обеспечивая при этом требования норм по II группе предельных состояний [7]. Многочисленные испытания реальных железобетонных конструкций с рабочей арматурой классов А500С и В500 позволяют заключить, что при  $A_{AA} = 450$  МПа обеспечиваются требуемые по ГОСТ 8829-94 запасы прочности, а снижение расхода стали в среднем составляет 15%.

#### Заключение

В Беларуси сложились реальные условия для массового перехода на единый класс ненапрягаемой арматуры с нормативным сопротивлением 500 МПа, что соответствует мировым тенденциям.

На белорусском металлургическом заводе освоено производство термомеханически упрочненной и холоднодеформированной арматуры классов А500С и В500 из углеродистой стали марки СтЗсп.

По химическому составу стали, механическим и технологическим свойствам такая арматура соответствует требованиям стандартов ISO/DIS 6935-2 и EN10080. Из-за низкого содержания углерода и легирующих элементов она не склонна к хрупким разрушениям в зонах сварных соединений.

Обладая характерной диаграммой деформирования с малым соотношением  $\sigma_u / \sigma_{02} = 1,05-1,21$  (в зависимости от диаметра и способа производства) при коэффициенте надежности  $\gamma_s = 1,1$  и расчетном сопротивлении 450 МПа, обеспечивает требуемые запасы прочности железобетонных конструкций и снижение их металлоемкости в среднем на 15% по сравнению с арматурой А-III (А400).

Из этой же марки стали путем ее горячей прокатки производится арматура А-I (А240) необходимого сортамента, которая используется в основном для монтажных петель.

Кроме этого, использование одной марки стали и одного класса арматуры выгодно как производителю, так и потребителю, поскольку при этом снижаются издержки производства и уменьшается себестоимость продукции.

На кафедре «Железобетонные и каменные конструкции» Полоцкого государственного университета были разработаны рабочие чертежи плит перекрытий многопустотных серии Б1.141.1, перемычек брусковых серии Б1.038.1-1 вып. 5 и перемычек плитных серии Б1.038.1-1 вып. 6. Их внедрение в производство полностью подтвердило экономическую эффективность арматуры с нормативным сопротивлением 500 МПа.

Разработаны и с августа 2001 г. введены в действие изменения СНиП 2.03.01-84\*, регламентирующие условия применения арматуры классов А500 и В500.

#### Литература

- Мадатян С. А., Михайлов К. В. Перспективы развития эффективной арматуры для обычных и преднапряженных конструкций // Бетон и железобетон. 1986. № 1. С. 23-24.
- Терин В. Д., Колтунов А. И., Лешкевич О. Н. Перспективы производства и применения ненапрягаемой арматуры повышенной прочности / Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Сб. науч. статей / Под ред. Т. М. Пецольда. Мн., 1996. С. 47-51.
- T. Breedijk. Betonstaal, fabricage- en lasbaarheidsaspecten // Cement. 1981. №4. P. 267-272.
- Лившиц Л. С., Хакимов А. Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 336 с.
- Стародубов К. Ф., Узлов И. Г., Савенков В. Я. и др. Термическое упрочнение проката. М.: Металлургия, 1970. 368 с.
- Simon H., Economopoulos M., Nilles P. / Tempcore. A new process for the production of high-quality reinforcing bars. Iron and steel Engineer. 1984. March. P. 53-57.
- Терин В. Д. Тенденции совершенствования арматуры железобетонных конструкций в Республике Беларусь // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: Сборник научных трудов / Под ред. Д. Н. Лазовского. Мн., 2001. С. 339-343.
- Рекомендации по применению в железобетонных конструкциях термомеханически упрочненной свариваемой стержневой арматуры новых видов. М.: НИИЖБ, 1997.

