

В.В. ДЬЯЧКОВ, канд. техн. наук (d_vv@mail.ru),
С.О. СЛЫШЕНКОВ, инженер (slyshenkov@mail.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона –
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6)

Оценка соответствия свойств арматурного проката техническим требованиям проекта АЭС «Эль-Дабаа»

Приведены результаты испытаний арматурного проката класса А500С, изготавливаемого металлургическим заводом в Арабской Республике Египет (АРЕ) по ГОСТ Р 52544, и их анализ на соответствие требованиям ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия» к арматурному прокату классов А500СНУ и/или А500СЕМ, требуемых по проекту АЭС «Эль-Дабаа». Целью данной работы является определение возможности металлургического завода выпускать арматурный прокат, соответствующий требованиям проекта АЭС «Эль-Дабаа». Приведен сравнительный анализ технических требований нормативно-технических документов (НТД) на арматурный прокат. Для оценки стабильности выпускаемого арматурного проката за предыдущий период приведены переданные заводом-изготовителем данные о технологических процессах изготовления проката, результатах контроля механических свойств и химического состава. Представлен анализ основных результатов испытаний, отобранных на заводе-изготовителе, образцов арматурного проката. В частности, приведены фактические геометрические характеристики периодического профиля, площадь поперечного сечения и масса, фактический химический состав и механические свойства арматурного проката класса А500С и выполнен их анализ на соответствие требованиям классов А500СНУ и/или А500СЕМ по ГОСТ 34028. Дана оценка результатам испытаний образцов сварных соединений арматурного проката класса А500С на растяжение, изгиб и срез на соответствие техническим требованиям ГОСТ 34028 к классам А500СНУ и/или А500СЕМ. Приведен анализ результатов испытаний на выносливость арматурного проката класса А500С и требований ГОСТ 34028 к классам А500СНУ и/или А500СЕМ. Уделено внимание некоторым отклонениям механических свойств, полученным по результатам испытаний арматурного проката, от требований ГОСТ 34028. Сформулированы выводы о соответствии арматурного проката класса А500С, изготавливаемого металлургическим заводом в АРЕ по ГОСТ Р 52544, требованиям классов А500СНУ и А500СЕМ по ГОСТ 34028 по проекту АЭС «Эль-Дабаа».

Ключевые слова: арматурный прокат, оценка соответствия, долговременный контроль, механические свойства.

Для цитирования: Дьячков В.В., Слышенков С.О. Оценка соответствия свойств арматурного проката техническим требованиям проекта АЭС «Эль-Дабаа» // Бетон и железобетон. 2022. № 6 (614). С. 25–32.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-25-32>

V.V. DYACHKOV, Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Head of the Centre № 3 (d_vv@mail.ru);
S.O. SLYSHENKOV, Engineer, Head of the Sector of the Centre № 3 (slyshenkov@mail.ru).

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZhB) named after A.A. Gvozdev JSC «Research Center «Construction»
(6, bul. 5, 2-nd Institutsкая Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Assessment of Compliance of the Properties of Rebar Rolled Products with the Technical Requirements of the El-Daba NPP Project

The article contains the test results of reinforcement of grade A500C manufactured by a metallurgical plant in the Arab Republic of Egypt (ARE) according to GOST R 52544 and their analysis for compliance with the requirements of GOST 34028 for reinforcement of grades of A500CHY and/or A500CEV required by the El Daba NPP project. The purpose of this work is to determine the possibility of the metallurgical plant to produce reinforcement that meet the requirements of the El Daba NPP project. A comparative analysis of the technical requirements of regulatory and technical documents (NTD) for reinforcement is given. To assess the stability of the manufactured reinforcement for the previous period, the data transmitted by the manufacturer on the technological processes of manufacturing reinforcement, the results of control of mechanical properties and chemical composition are given. The analysis of the main test results selected at the manufacturer, samples of reinforcement is presented. In particular, the actual geometric characteristics of the periodic profile, cross-sectional area and mass, the actual chemical composition and mechanical properties of reinforcement of grade A500C are given and their analysis for compliance with the requirements of grades A500CHY and/or A500CEV according to GOST 34028 is carried out. The evaluation of the test results of samples of welded joints of reinforcement of grade A500C for tension, bending and shear for compliance with the technical requirements of GOST 34028 to grade A500CHY and/or A500CEV is given. The analysis of the results of endurance tests of reinforcement of grade A500C and the requirements of GOST 34028 for grade A500CHY and/or A500CEV is given. The article pays attention to some deviations of mechanical properties obtained from the test results of reinforcement from the requirements of GOST 34028. Conclusions are formulated about the compliance of reinforcement of grade A500C manufactured by the metallurgical plant in the

ARE according to GOST R 52544 with the requirements of grades A500CHY and A500CEY according to GOST 34028 for the El Dabaa NPP project. The article is informational and analytical in nature and will be useful to specialists in solving issues of assessing the compliance of reinforcement with the requirements of foreign NPP construction projects.

Keywords: rebar, conformity assessment, long-term control, mechanical properties

For citation: Dyachkov V.V. Slyshenkov S.O. Assessment of compliance of the properties of rebar rolled products with the technical requirements of the El-Dabaa NPP project. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 6 (614), pp. 25–32. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-25-32>

Для строительных конструкций АЭС «Эль-Дабиа» проектом предусмотрено применение арматурного проката классов A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия». Однако не все металлургические заводы на территории АРЕ освоили производство арматурного проката классов A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028–2016 из-за более высоких требований по сравнению с A500C по ГОСТ Р 52544–2006 «Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов A500C и B500C для армирования железобетонных конструкций. Технические условия». При этом производство арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 (ГОСТ Р 52544–2006 отменен с 01.01.2018 г. в части горячекатаного и термомеханически упрочненного арматурного проката в связи с введением в действие на территории Российской Федерации ГОСТ 34028–2016) успешно освоено с 2008 г. [3], поэтому различными металлургическими предприятиями проводятся испытания образцов арматурного проката на соответствие техническим требованиям проекта АЭС «Эль-Дабиа».

Для оценки возможностей одного из металлургических заводов, расположенного в АРЕ, выпускать арматурный прокат в соответствии с требованиями проекта АЭС «Эль-Дабиа» в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева был выполнен комплекс мероприятий по оценке соответствия свойств арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 требованиям классов A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028–2016, включавший в себя кроме испытаний анализ технологии производства арматуры и качества выпускаемой продукции при долговременном контроле на заводе [1, 2].

На начальном этапе изучения свойств арматурного проката выполнен анализ технологического регламента производства арматуры на металлургическом заводе, который состоит из прямого восстановления железа (получения окатышей), изготовления непрерывно-литой заготовки, производства проката, упрочненного в потоке стана, и контроля качества различных операций и производств. Используемая на заводе технология прямого восстановления железа позволяет получать чистый металл с минимальным содержанием примесей, так как получение железа в виде губки происходит непосредственно из руды, минуя до-

менную печь [4]. Таким образом, этот процесс протекает без применения кокса, так как именно кокс вносит в больших количествах вредные примеси (фосфор и особенно серу). Прямое восстановление железа считается одним из самых перспективных направлений для эффективного развития мировой металлургии. Установлено, что использование губчатого железа при выплавке стали, в основном в электродуговых печах, позволяет производить наиболее высококачественный, экономически выгодный (с относительно низкой энергоемкостью) и экологически чистый металл (по сравнению с доменным процессом).

При выплавке стали в дуговых электропечах на металлургическом заводе используются металлизированные окатыши, т. е. не полностью восстановленные железорудные окатыши, получаемые методами прямого восстановления. Отличительной особенностью этого сырья является малое содержание серы, фосфора, меди, никеля, хрома и других примесей, обычно содержащихся в стальном ломе [5]. После окончания плавления окатышей из печи сливается большая часть окислительного шлака и далее металл без шлака разливают в ковш, куда вводят раскислители и легирующие. Затем ковш передают на установки внепечной обработки. На металлургическом заводе применяется технология непрерывного литья, сущность которой заключается в получении длинномерных отливок послойного поперечного сечения непрерывной заливкой литейных форм-кристаллизаторов на установках непрерывного действия [6]. На металлургическом заводе применяется технология термомеханического упрочнения арматурного проката в потоке стана, это технологическая операция, направленная на повышение предела текучести и временного сопротивления арматурного проката (или одного из этих параметров) за счет ускоренного охлаждения проката после выхода из последней клетки прокатного стана на линии проходного типа. Технология термомеханического упрочнения арматурного проката в потоке стана с прокатного нагрева является эффективным способом повышения прочностных характеристик арматурного проката, обеспечивающим снижение расхода дорогостоящих легирующих и экономию энергии [7].

Анализ данных по используемым технологическим процессам на металлургическом заводе, расположенном в АРЕ, показал, что при производстве

Таблица 1
Table 1Требования нормативной документации (НТД) к механическим свойствам арматуры
NTD requirements for the mechanical properties of reinforcement

Наименование показателя (характеристики)	Требования НТД		
	ГОСТ Р 52544–2006	ГОСТ 34028–2016	
	A500C	A500CHY	A500CEV
Предел текучести σ_T ($\sigma_{0,2}$), МПа, не менее	500	500	500
Временное сопротивление σ_B , МПа, не менее	600	600	600
Отношение фактических значений σ_B/σ_T ($\sigma_B/\sigma_{0,2}$), не менее	1,08	1,08	1,15–1,35
Относительное удлинение δ_5 , %, не менее	14	16	16
Относительное удлинение δ_{max} (A_{gt}), %, не менее	–	5	7

арматурного проката используются современные технологии: прямое восстановление железа (получение окатышей), выплавка стали в дуговых электропечах с разливкой и доводкой в ковше, изготовление непрерывно литой заготовки и прокатка термомеханически упрочненного в потоке стана арматурного проката; все это в целом обеспечивает техническую возможность данного завода изготавливать арматурный прокат с механическими и эксплуатационными свойствами, отвечающими требованиям классов A500CHY и/или A500CEV по ГОСТ 34028–2016.

После анализа технологических процессов производства арматурного проката выполнен сравнительный анализ требований к арматурному прокату класса A500C по ГОСТ Р 5254–2006 и классов A500CHY и/или A500CEV по ГОСТ 34028–2016. В частности, сравнивались требования нормативных документов к геометрическим параметрам, погонной массе, качеству поверхности, химическому составу, механическим и эксплуатационным свойствам арматурного проката.

Согласно результатам сравнительного анализа, требования ГОСТ Р 52544–2006 к геометрическим параметрам, погонному весу, качеству поверхности, химическому составу, механическим и эксплуатационным свойствам, правилам контроля, упаковки и маркировки арматурного проката класса A500C практически полностью соответствуют требованиям ГОСТ 34028–2016 для арматуры класса A500CHY, поэтому арматурный прокат класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 является возможным вариантом замены арматурного проката класса A500CHY по

ГОСТ 34028–2016 при возведении конструкций АЭС «Эль-Дабба». Значительными отличиями в требованиях арматуры класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 и A500CEV по ГОСТ 34028–2016, указанных в табл. 1, являются различия в нормируемых значениях показателей пластичности δ_5 и $\delta_{max}(A_{gt})$ и отношении временного сопротивления к пределу текучести $\sigma_B/\sigma_{T(0,2)}$.

Таким образом, арматурный прокат класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 может являться вариантом возможной замены арматурного проката класса A500CEV по ГОСТ 34028–2016 при возведении конструкций по проекту АЭС «Эль-Дабба» только после подтверждения соответствия фактических механических свойств при растяжении требованиям класса A500CEV по ГОСТ 34028–2016.

Для анализа качества выпускаемой продукции при долговременном контроле были проанализированы переданные заводом сведения об арматурном прокате за 2021–2022 гг., включавшие в себя химический состав и механические свойства.

Результаты оценки уровня качества при долговременном контроле механических свойств, по данным завода-изготовителя, приведены в табл. 2.

Анализ свойств при долговременном контроле на заводе показал, что вероятные значения, с обеспеченностью $P=0,95$, предела текучести и временного сопротивления не соответствуют требованиям арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 и классов A500CHY и A500CEV по ГОСТ 34028–2016. Причиной такого несоответствия является значительная изменчивость показателей [8]. Вызвано это

Таблица 2
Table 2Вероятные значения механических свойств арматурного проката класса A500C
Probable values of mechanical properties of reinforcement of grade A500C

Механические характеристики арматурного проката	$\sigma_T(\sigma_{0,2})$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_B/\sigma_{T(0,2)}$	Δ_5 , %	$\delta_{max}(A_{gt})$, %
Среднее значение в партии X_{cp}	555,4	653	1,177	20,4	8,9
Среднеквадратическое отклонение в партии S_0	30,65	31,42	0,04	2,21	1,01
Оценка параметров при обеспеченности 95% (для Δ_5 и A_{gt} – 90%) и вероятности 90%, $X_{cp}-K \times S_0 \geq C_{min}$	493,8	589,9	1,097	16,8	7,24

Таблица 3
Table 3

Результаты оценки химического состава арматурного проката класса A500C
Results of evaluation of the chemical composition of reinforcement of grade A500C

Номинальный диаметр, мм	Химический состав (ковшовая проба или расплав)										C _{экв} x 100, %
	C x 100, %	Si x 100, %	Mn x 100, %	P x 1000, %	S x 1000, %	Cr x 100, %	Ni x 100, %	Cu x 100, %	V x 1000, %	N, ppm	
12	18	15	64	15	18	3	3	10	1	69	30
16	18	15	64	15	18	3	3	10	1	69	30
20	19	15	136	8	15	4	3	8	66	37	44
25	19	15	136	8	15	4	3	8	66	37	44
32	19	15	136	8	15	4	3	8	66	37	44
40	19	17	146	13	17	3	3	11	128	105	48
Нормативные требования ГОСТ 34028–2016 к A500C											
	≤22	≤90	≤160	≤50	≤50	–	–	≤35	≤100	≤120	30–501
Примечание. Ø12–18 мм – C _{экв} = 0,3–0,5%; Ø20–28 мм – C _{экв} = 0,35–0,5%; Ø32–40 мм – C _{экв} = 0,4–0,5%.											

тем, что производством арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 металлургический завод занимался локально и не более двух лет, что не соответствует серийному производству и следует классифицировать, как опытно-промышленные партии арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006.

Следует отметить, что на данном металлургическом заводе налажено серийное производство свариваемого арматурного проката с серповидным периодическим профилем класса B500B по BS 4449 и класса A500C по ST 009 с нормируемым пределом текучести не менее 500 МПа, для которого выполняется соответствующая оценка показателей механических свойств при долговременном контроле уровня качества проката.

Результаты оценки химического состава стали арматурного проката класса A500C приведены в табл. 3.

Химический состав арматурного проката класса A500C диаметром 12–32 мм, определенный изготовителем в ковшовой пробе, и значения углеродного эквивалента C_{экв} соответствуют требованиям классов A500CHU и/или A500CEU по ГОСТ 34028–2016. Однако у арматурного проката класса A500C диаметром 40 мм выявлено отличие от требований ГОСТ 34028–2016 в части содержания ванадия (V) 0,128 %, которое превышает максимально допустимое значение для классов A500CHU и/или A500CEU по ГОСТ 34028–2016 не более 0,1%.

Для серийно выпускаемой арматуры класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 производства металлургического завода, расположенного в АРЕ, взамен проката классов A500CHU и/или A500CEU по ГОСТ 34028–2016 следует скорректировать содержа-

ние микролегирующих элементов и контролировать содержание химических элементов и значение углеродного эквивалента каждой плавки в соответствии с требованиями ГОСТ 34028–2016. На начальном этапе серийного производства (не менее 6 месяцев) необходимо дополнительно контролировать механические свойства арматурного проката на удвоенном количестве образцов с приемкой по гарантированным минимальным браковочным значениям и оценкой уровня качества за текущий период в соответствии с ГОСТ 34028–2016.

После анализа НТД, технологических процессов изготовления арматурного проката и оценки качества продукции при долговременном контроле для подтверждения соответствия фактических механических свойств на заводе были отобраны образцы арматурного проката диаметром 12, 25 и 40 мм. Диаметр арматурного проката для испытаний принят таким образом, чтобы охватить весь сортамент, выпускаемой заводом продукции. Испытания отобранных образцов арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 на соответствие требованиям классов A500CHU и/или A500CEU по ГОСТ 34028–2016 включали в себя [9]:

- оценку геометрических параметров и массы;
- оценку механических свойств при растяжении и изгибе;
- оценку химического состава;
- оценку свариваемости;
- оценку усталостной прочности арматурного проката.

Результаты измерения геометрических параметров, погонной массы и площади поперечного сечения арматурного проката класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 показали, что фактические ос-

новые геометрические размеры профиля отвечают требованиям классов A500CHU и A500CEU по ГОСТ 34028–2016. Значения относительной площади смятия поперечных ребер f_R находятся в диапазоне 0,057–0,075, что соответствует нормативным требованиям арматурного проката классов A500CHU и A500CEU по ГОСТ 34028–2016. Фактическая площадь поперечного сечения A_n и вес 1 м длины всех испытанных образцов арматуры класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 соответствуют требованиям классов A500CHU и A500CEU по ГОСТ 34028–2016.

На поверхности арматурного проката класса A500C диаметром 12 и 25 мм не обнаружено трещин, закатов, плен и раковин, ухудшающих его характеристики, что соответствует ГОСТ 34028–2016. Однако на арматурном прокате диаметром 40 мм в поперечных ребрах выявлены локальные закалочные трещины (рис. 1), что противоречит п. 5.5.1 ГОСТ 34028–2016 и требует изменения режимов прокатки и химического состава для данного диаметра.

Для определения механических свойств отобранного арматурного проката (в состоянии поставки) проводились испытания на растяжение и изгиб. Перед испытанием на растяжение образцы длиной 500–600 мм размечали с шагом 10 мм, определялась масса образцов с точностью до 2 г, измерялась их длина с точностью до 1 мм и вычислялась площадь поперечного сечения. Предварительную разметку использовали для определения относительных удлинений δ_5 и δ_p после испытания образцов. Испытания на растяжение проводили по методике ГОСТ 12004–81 «Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение» в лабораторных условиях поэтапным нагружением вплоть до разрыва образца на



Рис. 1. Общий вид трещин в поперечных ребрах арматурного проката диаметром 40 мм

Fig. 1. General view of cracks in the transverse ribs of reinforcement with a diameter of 40 mm

испытательной гидравлической машине Instron серии HDX мод. 1000HDX.

Результаты испытаний на растяжение, указанные в табл. 4, показали однородность значений предела текучести и временного сопротивления арматурного проката класса A500C и соответствие статистических показателей требованиям классов A500CHU и A500CEU по ГОСТ 34028–2016. Однако в части отношения $\sigma_B/\sigma_{T(0,2)}$ и полного относительного удлинения $\delta_{max}(A_{gt})$ арматурный прокат диаметром 12 мм не соответствует требованиям A500CEU по ГОСТ 34028–2016.

Испытания на изгиб показали, что все образцы выдержали угол изгиба 180° вокруг оправки диаметром

Таблица 4
Table 4

Механические свойства арматуры класса A500C
Mechanical properties of reinforcement of grade A500C

Статистические показатели	Диаметр, мм	Механические свойства				
		$\sigma_T(\sigma_{0,2})$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_B/\sigma_{T(0,2)}$	Δ_5 , %	$\delta_{max}(A_{gt})$, %
Среднее значение в партии X_{cp}	12	552,9	634,1	1,15	21,6	7,3
	25	533,1	647	1,21	21,2	9,9
	40	559,3	736,5	1,32	20,3	11,6
Среднеквадратическое отклонение в партии S	12	6,49	2,69	0,01	0,82	0,44
	25	1,97	0,27	0,005	1,75	0,61
	40	3,08	12,49	0,02	1,04	1
Оценка механических свойств при обеспеченности 95% (для δ_5 и A_{gt} – 90%) и вероятности 90%, $X_{cp}-ks \geq C_{min}$	12	532,9	625,8	1,12	19,6	6,2
	25	527	646,2	1,2	16,8	8,4
	40	549,7	697,9	1,27	17,7	9,1
Требования ГОСТ 34028–2016 к классу A500CHU		≥ 500	≥ 600	$\geq 1,08$	≥ 16	≥ 5
Требования ГОСТ 34028–2016 к классу A500CEU		≥ 500	≥ 600	1,15–1,35	≥ 16	≥ 7
Требования ГОСТ Р 52544–2006 к классу A500C		≥ 500	≥ 600	$\geq 1,08$	≥ 14	–



Рис. 2. Образцы после испытаний: а — при растяжении; б — при изгибе
Fig. 2. Samples after testing: a — tensile testing; b — bending

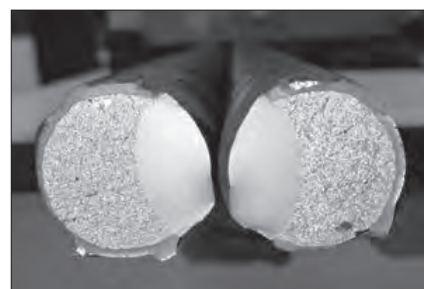


Рис. 3. Характер разрушения арматурного проката диаметром 40 мм при действии многократно повторяющейся нагрузки
Fig. 3. The nature of the destruction of reinforcement with a diameter of 40 mm under the action of a repeatedly repeated load

$D=3d_n$, трещин на образцах после проведения испытаний не обнаружено, это удовлетворяет требованиям классов А500СНУ и А500СЕУ по ГОСТ 34028–2016.

Образцы после испытаний показаны на рис. 2.

Результаты испытаний показали, что арматурный прокат диаметром 12–40 мм класса А500С по ГОСТ Р 52544–2006 по механическим свойствам соответствует требованиям класса А500СНУ по ГОСТ 34028–2016, при этом диаметр 25–40 мм соответствует требованиям класса А500СЕУ по ГОСТ 34028–2016.

Для определения химического состава стали предоставленных образцов арматурного проката использовали оптико-эмиссионный метод по ГОСТ Р 54153–2010. Химический состав определяли с помощью спектрометра АРГОН-5СФ.

Результаты определения химического состава арматурного проката класса А500С приведены в табл. 5.

Оценка содержания химических элементов в готовом прокате и значений углеродного эквивалента позволяет сделать вывод о соответствии химического состава исследованных образцов арматурного проката класса А500С диаметром 12–40 мм производства завода-изготовителя требованиям классов А500СНУ и А500СЕУ по ГОСТ 34028–2016. Повышенное содержание, не более 0,1%, ванадия в стали арматурного проката класса А500С диаметром 40 мм необходимо скорректировать при серийном производстве.

В соответствии с требованиями ГОСТ 34028–2016 свариваемость арматуры обеспечивается химическим составом, технологией изготовления и контролируется путем испытания ее сварных соединений.

Анализ технологии производства и химический состав стали показали возможность изготовления заводом свариваемого арматурного проката, который необходимо подтвердить испытаниями на растяжение и изгиб образцов сварных соединений, выполненных различными способами сварки, наиболее часто применяемыми в строительстве и в наибольшей степени влияющим на изменение свойств исходной стали.

Исследования свариваемости арматурного проката класса А500С проводились по методике, приведенной в ГОСТ 34028–2016, Приложение Г. Типы сварных соединений и способы сварки образцов, изготовленных для проведения контрольных испытаний, назначались в соответствии с требованиями ГОСТ 34028–2016, Приложение Г, и ГОСТ 14098 «Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Типы, конструкции и размеры». Технологические условия сварки образцов назначались в соответствии с требованиями РТМ 393–94 «Руководящие технологические материалы по сварке и контролю качества соединений арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций».

Способы контроля и методики испытания готовых сварных соединений арматуры принимались в

Таблица 5
Table 5

Химический состав стали в готовом арматурном прокате класса А500С
Chemical composition of steel in original state reinforcement of grade А500С

Класс, диаметр, плавка	Массовая доля химических элементов в стали (готовый прокат), %											C _{экв}
	C	Si	Mn	V	Nb	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	
12 мм	0,198	0,145	0,598	<0,005	<0,005	0,007	0,03	0,037	0,102	0,014	0,0156	0,315
25 мм	0,196	0,142	1,349	0,061	0,007	0,007	0,03	0,03	0,09	0,0087	0,0119	0,448
40 мм	0,191	0,166	1,448	0,11	0,011	0,008	0,03	0,031	0,096	0,0116	0,0151	0,47
А500С по ГОСТ Р 52544	≤0,24	≤0,95	≤1,7	—	—	—	—	—	≤0,35	≤0,055	≤0,055	≤0,52
А500С по ГОСТ 34028	≤0,24	≤0,95	≤1,7	≤0,1	≤0,1	≤0,1	—	—	≤0,35	≤0,055	≤0,055	≤0,52

Таблица 6
Table 6

Результаты испытаний на выносливость арматурного проката класса A500C
Results of fatigue tests of reinforcement of grade A500C

Характеристика образца	Усилия цикла, кН			Пройденное число циклов	Характеристика разрушения образца
	P_{max}	P_{min}	ΔP		
Диаметр 12 мм	33,93	16,97	16,97	2 032 700	На рабочей базе образца разрушения не выявлены
				2 015 100	
				2 016 800	
Диаметр 25 мм	147,27	73,64	73,64	2 020 000	На рабочей базе образца разрушения не выявлены
				2 017 000	
				2 018 500	
А500С, диаметр 40 мм (151699)	376,98	188,49	188,49	1 211 900	Усталостное разрушение образца на рабочей базе (рис. 3)
				1 845 300	
				—	
Требования ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016				≥ 2 000 000	Не допускаются разрушения на рабочей базе образца*
Примечание. *Обрыв в захвате и на расстоянии до $2d_n$ от захвата не является браковочной характеристикой.					

соответствии с ГОСТ Р 57997–2006 «Арматурные и закладные изделия сварные, соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Общие технические условия».

Результаты испытаний сварных образцов показали, что термомеханически упрочненный прокат класса A500C по ГОСТ Р 52544–2006 диаметром 12 и 25 мм соответствует требованиям свариваемости арматуры класса A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028, при этом эксплуатационные свойства сварных соединений проката диаметром 40 мм не полностью соответствуют требованиям ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016, так как выявлены разрушения крестообразных сварных соединений при изгибе, что недопустимо. Для обеспечения стабильной свариваемости арматурного проката диаметром выше 25 мм при серийном производстве необходимо подкорректировать концентрацию легирующих элементов в стали и отработать режимы термомеханического упрочнения проката в потоке стана, а затем подтвердить требуемые эксплуатационные свойства.

Испытаниям на выносливость при многократно повторяющихся циклических нагрузках подвергались отобранные случайным образом от разных стержней образцы проката минимального и максимального диаметров из производимого заводом сортамента.

Методика испытания образцов арматурного проката класса A500C на выносливость при многократно повторяющихся циклических нагрузках принята в соответствии с требованиями Приложения Е ГОСТ 34028–2016. Испытания на выносливость выполнялись на сервогидравлической машине «SCHENCK POZ 0691».

Результаты испытаний образцов на выносливость приведены в табл. 6.

Результаты испытаний на выносливость при действии многократно повторяющихся циклических нагрузок показали, что арматурный прокат класса A500C по ГОСТ 52544–2006 диаметром 12 и 25 мм соответствует требованиям класса A500CHY и A500CEY по ГОСТ 34028–2016. Образцы арматурного проката класса A500C диаметром 40 мм во всех случаях при воздействии многократно повторяющейся нагрузки разрушались в рабочей зоне образца после $1,211 \times 10^6$ – $1,845 \times 10^6$ циклов, что не соответствует ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016. Зарождение усталостной трещины происходило у основания поперечных ребер в местах сопряжения с телом стержня, зона хрупкого излома составляет около 30% от площади поперечного сечения (рис. 3), при этом на остальной части сечения отсутствуют признаки пластического разрыва.

Для обеспечения соответствия арматурного проката класса A500C диаметром 40 мм требованиям выносливости по ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016 при серийном производстве необходимо снизить влияния концентраторов напряжения, а именно внести изменения в используемые калибры и добиться более плавного перехода поперечного ребра в тело стержня, а также отсутствия трещин на поверхности проката [10] и понизить концентрацию содержания ванадия в стали, в некоторой степени способствующего повышению твердости поверхностного слоя металла и, как следствие, его чувствительности к концентраторам и дефектам.

Выводы

Представленный для исследований арматурный прокат класса A500C диаметром 12 и 25 мм по ГОСТ Р 52544–2006 производства металлургического завода, расположенного в АРЕ, соответству-

ет требованиям классов A500CHU и A500CEU по ГОСТ 34028–2016.

Арматурный прокат класса A500C по ГОСТ 52544–2006 диаметром 40 мм по ряду показателей не соответствует требованиям ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016, необходимо отработать технологию изготовления данного проката, обеспечить стабильность качества поверхности, механических и эксплуатационных свойств в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52544–2006 и ГОСТ 34028–2016. Данный прокат может быть использован наряду и взамен проката классов A500CHU и A500CEU при возведе-

нии железобетонных конструкций по проекту АЭС «Эль-Дабаа» только при прохождении процедуры оценки соответствия требованиям ГОСТ 34028–2016 с учетом выше изложенных рекомендаций.

В статье приведен порядок выполненных мероприятий, достаточных для достоверной оценки соответствия арматурного проката требованиям классов A500CHU и A500CEU по проекту АЭС «Эль-Дабаа». Данный порядок может применяться для оценки соответствия продукции требованиям зарубежных проектов строительства АЭС любых металлургических предприятий.

Список литературы

1. Полякова М.А., Харитонов В.А., Петров И.М. Оценка процесса производства арматурного проката на основе статистических показателей // *Теория и технология металлургического производства*. 2018. № 2. С. 22–26.
2. Кривцова О.Н., Кузьмина Н.Ю., Цыганова В.М. Оценка стабильности качества арматурного проката посредством статистических методов контроля // *Труды университета*. 2017. № 2. С. 105–108.
3. Мадатян С.А., Падин О.И., Гиниятулина Г.Н. Результаты сертификационных испытаний импортного арматурного проката класса A500C // *Бетон и железобетон*. 2008. № 1. С. 7–11.
4. Юсфин Ю.С., Гиммельфарб А.А., Пашков Н.Ф. Новые процессы производства металла. М.: Металлургия, 1994. 320 с.
5. Меденков С.А. Перспективное использование металлизированных окатышей в электрометаллургии. *НАУКА ЮУРГУ: Материалы 66-й научной конференции*. Челябинск, 2014. С. 1404–1410.
6. Стеблов А.Б., Березов С.Н. Технология МНЛЗ малых сечений // *Литье и металлургия*. 2013. № 4. С. 85–88.
7. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М.: Воентехлит, 2000. 256 с.
8. Харитонов В.А., Ильина Н.Н., Петров И.М. Анализ уровня качества арматурной стали A400C и A500C на основе методов математической статистики // *Качество в обработке материалов*. 2016. № 1. С. 18–22.
9. Цыба О.О., Дьячков В.В., Саврасов И.П., Панченко А.И. О новом межгосударственном стандарте ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций» // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 3. С. 23–31.
10. Городницкий Ф.М., Михайлов К.В. Выносимость арматуры железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1972. 151 с.

References

1. Polyakova M.A., Kharitonov V.A., Petrov I.M. Evaluation of the reinforcement process based on statistical indicators. *Theoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2018. No. 2, pp. 22–26. (In Russian).
2. Krivtsova O.N., Kuzminova N.Yu., Tsygankova V.M. Assessment of the stability of the quality of reinforcement by statistical control methods. *Trudy universiteta*. 2017. No. 2, pp. 105–108. (In Russian).
3. Madatyan S.A., Padin O.I., Giniyatullina G.N. Results of certification test of imported reinforcement of grade A500C. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2008. No. 1, pp. 7–11. (In Russian).
4. Yusfin Y.S., Himmelfarb A.A., Pashkov N.F. Novye protsesy proizvodstva metalla [New processes of metal production]. Moscow: Metallurgiya, 1994. 320 p.
5. Medenkov S.A. Promising use of metallized pellets in electrometallurgy. *SUSU SCIENCE. Materials of the 66th Scientific Conference*. Chelyabinsk. 2014. C.1404–1410.
6. Steblov A.B., Berezov S.N. Technology of small cross-section MNLZ. *Lit'e i metallurgiya*. 2013. No. 4, pp. 85–88. (In Russian).
7. Madatyan S.A. Reinforcement of reinforced concrete structures [Armatura zhelezobetonnykh konstruktсий]. Moscow: Voentehlit, 2000. 256 p.
8. Kharitonov V.A., Ilyina N.N., Petrov I.M. Analysis of the quality level of reinforcing steel A400C and A500C based on methods of mathematical statistics. *Kachestvo v obrabotke materialov*. 2016. No. 1, pp. 18–22. (In Russian).
9. Tsyba O.O., Dyachkov V.V., Savrasov I.P., Panchenko A.I. On the new interstate standard GOST 34028–2016 «Reinforcement for reinforced concrete structures». *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2017. No. 3, pp. 23–31. (In Russian).
10. Gorodnitsky F.M., Mikhailov K.V. Vynoslivost' armatury zhelezobetonnykh konstruktсий [Fatigue of reinforcement of reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 151 p.