



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-73-80>
УДК 669.1.015.7

Поступила 27.01.2025
Received 27.01.2025

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АРМАТУРНОГО ПРОКАТА В БУХТАХ

С. А. САВЧЕНКО, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин, Гомельская обл., Республика Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: gnp.tu@bmz.gomel.by
А. Б. СЫЧКОВ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»,
г. Магнитогорск, Челябинская обл., Российская Федерация, пр. Ленина, 38. E-mail: absychkov@mail.ru

Проведены исследования изменения температуры арматурного проката по длине витка в зависимости от подачи воздуха в контрольных точках на протяжении участка воздушного охлаждения линии двухстадийного охлаждения «Стелмор». Определено влияние изменения режимов воздушного охлаждения на изменение механических свойств арматуры № 8 и 10 класса прочности А500С с формой периодического профиля 2ф в бухтах по требованиям ГОСТ 34028–2016. С помощью метода наименьших квадратов в рамках корреляционно-регрессионного анализа получены линейные модели множественной регрессии для расчета температуры центра и края витков на роликовом транспортере (по ширине транспортера в участках скопления витков – край и одиночных витков – центральные участки) арматурного проката на линии «Стелмор», а также регрессионные зависимости механических свойств проката от химического состава стали и технологических параметров охлаждения металла, которые можно использовать для прогнозирования технологии воздушного охлаждения арматурного проката в бухтах с целью получения заданных структуры и механических свойств.

Ключевые слова. Ребристый арматурный прокат в бухтах, микроструктура по сечению проката, механические свойства арматуры, рольганг воздушного охлаждения катанки (роликовый транспортер витков), скорость охлаждения, регрессионные уравнения.

Для цитирования. Савченко, С. А. Практическое использование результатов корреляционно-регрессионного анализа для прогнозирования качества арматурного проката в бухтах / С. А. Савченко, А. Б. Сычков // Литие и металлургия. 2025. № 1. С. 73–80. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-73-80>.

PRACTICAL APPLICATION OF CORRELATION-REGRESSION ANALYSIS RESULTS FOR PREDICTING THE QUALITY OF COILED REBAR PRODUCTS

S. A. SAVCHENKO, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Zhlobin, Gomel Region, Republic of Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: gnp.tu@bmz.gomel.by
A. B. SYCHKOV, Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation, 38, Lenina Ave. E-mail: absychkov@mail.ru

The study examines temperature variations along the length of rebar coils in relation to air supply at control points during the air-cooling stage of the two-stage Stelmor cooling line. The influence of air-cooling mode variations on the mechanical properties of Ø8 mm and Ø10 mm A500C-grade rebar with a periodic profile of type 2f, in accordance with GOST 34028–2016, has been determined. Using the least squares method within the framework of correlation-regression analysis, linear multiple regression models were developed to calculate the temperature at the center and edges of coils on the roller conveyor (across the width of the conveyor in areas of coil accumulation and in individual coil sections). Additionally, regression dependencies were established to predict the mechanical properties of rebar based on the steel's chemical composition and technological cooling parameters. These models can be used to optimize the air-cooling process for coiled rebar products to achieve the required microstructure and mechanical properties.

Keywords. Ribbed coiled rebar; microstructure across the rebar cross-section, mechanical properties of rebar, wire rod air-cooling roller conveyor; cooling rate, regression equations.

For citation. Savchenko S. A., Sychkov A. B. Practical application of correlation-regression analysis results for predicting the quality of coiled rebar products. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 73–80. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-73-80>.

Введение

Одним из основных направлений развития технологии производства арматурного проката в бухтах является разработка эффективных режимов двухстадийного охлаждения, обеспечивающих наряду с высоким качеством готового проката и высокой производительностью станов гибкость процесса при производстве различного сортамента, сокращение эксплуатационных и производственных затрат. В целях обеспечения получения гарантированных и научно обоснованного прогнозирования функции отклика (например, механических свойств и/или характеристик микроструктуры проката и т.п.) приобретает практическое применение результатов корреляционно-регрессионного анализа и расчет регрессионных зависимостей этих функций от химического состава стали и технологических параметров – факторов уравнений [1–3].

Проводимые исследования направлены на изучение влияния режимов работы вентиляторов (блоков струйного охлаждения – БСО), скорости перемещения витков на транспортере на линии «Стелмор», а также определение степени влияния (вклада) и количественного изменения факторов на равномерность, например, механических свойств проката. Корреляционный анализ определяет уровень статистической значимости факторов (X) друг на друга и на изучаемый показатель качества (Y) через расчет парных коэффициентов корреляции с отсеиванием незначимых факторов и расчетом уравнений регрессии – уравнений связи зависимых случайных величин (Y) от независимых случайных величин – статистически значимых факторов (X). Далее оценивается качество регрессионных уравнений по показателям коэффициента детерминации R^2 , множественного коэффициента корреляции R , критерия Фишера F , критерия Стьюдента t , соответственно оценивается степень линейности уравнения, адекватность уравнения реальному технологическому процессу, значимость рассчитанных методом наименьших квадратов (МНК) коэффициентов при факторах.

Поставленные выше задачи исследования достигаются определением:

- влияния режимов работы вентиляторов БСО № 1–6 на интенсивность охлаждения арматурного проката;
- зависимости изменения скорости роликового транспортера витков линии «Стелмор» на формирование однородности структуры и механических свойств проката в бухтах;
- расчетных зависимостей температуры арматурного проката, структуры и механических свойств от изменения таких факторов (технологических параметров), как температура виткообразования, интенсивность воздушного охлаждения вентиляторами БСО № 1–6; скорость транспортирования витков к виткосборнику.

После проведения комплекса исследований необходимо проведение анализа результатов и формулирование выводов.

Главной проблемой воздушного охлаждения является неравномерность охлаждения по краям и центру витков [4], так как при их раскладке на роликовый транспортер они накладываются друг на друга в боковых (крайних) участках транспортера, а в центре рольганга располагаются одиночные витки проката. Повышение равномерности охлаждения проката по длине витков определяется рядом условий, таких, как раскладка витков виткообразователем с рассеиванием их по ширине транспортирующего рольганга с целью уменьшения наложения витков друг на друга, так называемый режим вабуляции, улучшение распределения охлаждающего воздуха в коробах БСО (например, дифференцированной подачей воздуха по ширине транспортера витков по отдельным рукавам, расположенным в коробе БСО – по опыту Белорецкого металлургического комбината), максимальным растяжением витков проката по длине транспортера витков, увеличением скорости их транспортирования и другими мероприятиями [5–7].

На первом этапе исследований проведены эксперименты по определению влияния величины подачи воздуха вентиляторов БСО на охлаждение арматуры номинальным диаметром 8 и 10 мм класса прочности А500С с формой поверхности 2ф в бухтах по требованиям ГОСТ 34028–2016. Для этого с помощью стационарного пирометра и тепловизора (рис. 1) осуществляли измерение температуры центра и краев витков арматурного проката по ширине транспортера витков.

Мощность потока воздуха по отдельным вентиляторам изменялась от 20 до 50%. Прокатку осуществляли с одного посада заготовок разных плавок с интервалом измерений 1 ч. Корректировок технологического режима в потоке стана не проводили. Для статистического анализа принимали средние значения температуры центра и края перемещаемых витков проката в семи контрольных участках-позициях (рис. 2, 3):

- 1 – в зоне виткообразователя перед вентилятором № 1;
- 2 – после вентилятора № 1 по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 7200 мм);
- 3 – после вентилятора № 2 по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 10 200 мм);
- 4 – после вентилятора № 3 по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 13 200 мм);

- 5 – после вентилятора № 4 по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 16 200 мм);
- 6 – после вентилятора № 5 по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 19 200 мм);
- 7 – в зоне виткосборника по центру и краю витка (расстояние от виткообразователя 120 000 мм).

Далее по результатам измерений и после обработки данных методом наименьших квадратов получены две линейные зависимости: множественная регрессия расчета температуры центра и края витков

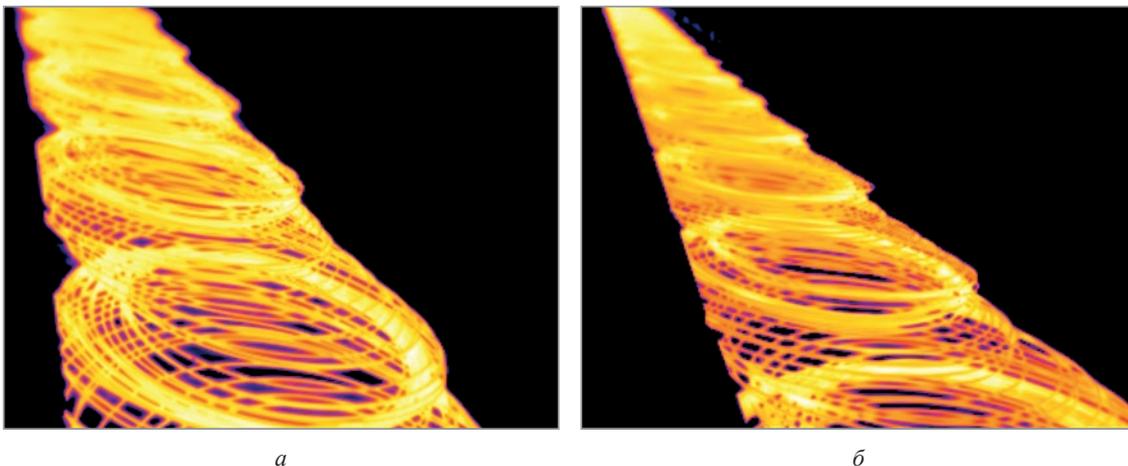


Рис. 1. Изображение съемки с тепловизора:

а – экспериментальный режим № 1 охлаждения арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм;
 б – экспериментальный режим № 2 охлаждения арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм

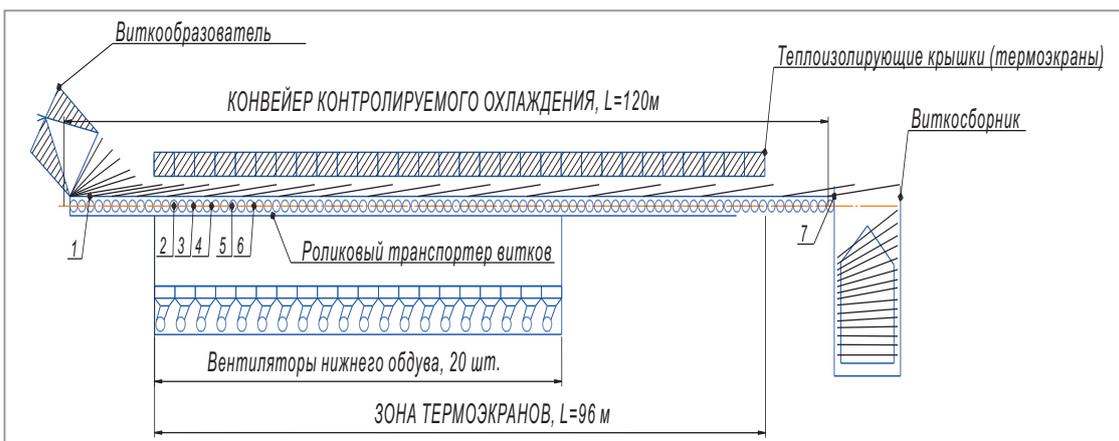


Рис. 2. Схема воздушного охлаждения на линии «Стелмор» стана 370/150

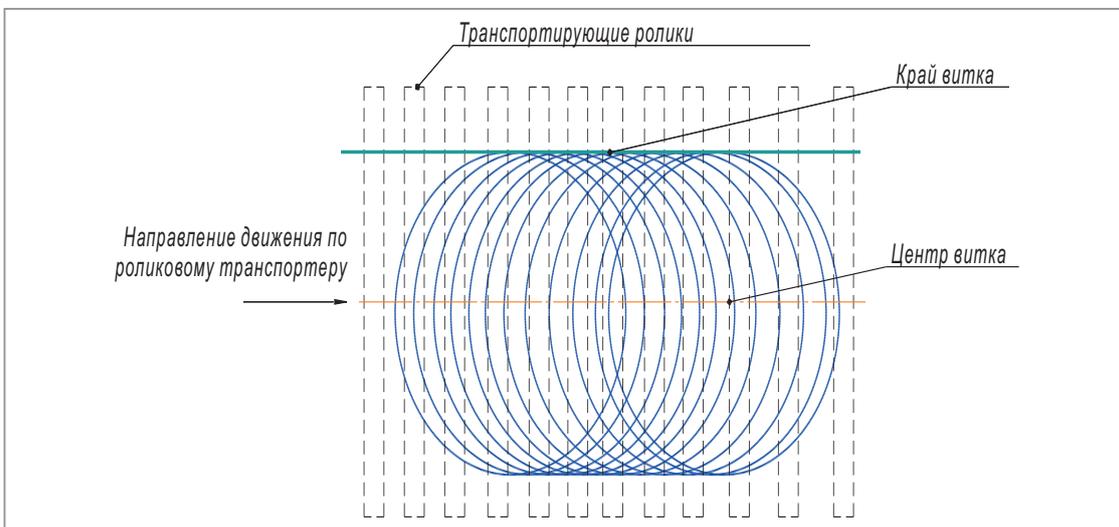


Рис. 3. Схема транспортирования витков на линии «Стелмор» стана 370/150

арматурного проката на роликовом транспортере. Данные в точке 1 (в зоне виткообразователя перед первым вентилятором) практически не отличаются друг от друга, в связи с чем данный фактор в уравнении является лишним. Полученные уравнения позволяют рассчитать температуру витков проката в бухтах от исходной в зоне укладки (температура виткообразования) в зависимости от степени мощности вентилятора для края и центра витка (по ширине транспортера витков):

$$\begin{aligned} & \text{для центра витка, } ^\circ\text{C:} \\ T_{\text{центр}} &= 1227,8 - 55,14d - 34,2n - 172,31 V_T - 3,92 P, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \text{для края витка, } ^\circ\text{C:} \\ T_{\text{края}} &= 1121,06 - 40,54d - 31,54n - 215,9 V_T - 2,22 P, \end{aligned} \quad (2)$$

где d – номинальный диаметр арматуры, мм; n – номер задействованного вентилятора; V_T – скорость транспортирования на линии «Стелмор»; P – мощность включения вентилятора, доли от 1; 1227,8, 55,14, 34,2, 172,31, 3,92 – расчетные коэффициенты для центра; 1121,06, 40,54, 31,54, 215,9, 2,22 – расчетные коэффициенты для поверхности

Полученный коэффициент множественной корреляции свидетельствует о существовании статистически значимой линейной связи между переменными. Также для определения статистической значимости и качества регрессионных зависимостей проведен расчет (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Оценка регрессионных уравнений (1), (2)

Место контроля температуры	Параметры уравнения	Параметры адекватности моделей уравнений						
		$F_{\text{(табл)}}$	$F_{\text{(расч)}}$	$t_{\text{(табл)}}$	$t_{\text{(расч)}}$	R^2	R	N
Центр, уравнение (1)	Свободный член	2,38	4344,8	1,96	110,34	0,89	0,94	2251
	d				56,10			
	n				76,41			
	V_T				34,37			
	P				67,25			
Край, уравнение (2)	Свободный член	2,38	2871,1	1,96	91,41	0,83	0,91	2351
	d				37,64			
	n				65,41			
	V_T				38,28			
	P				34,27			

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации; R – коэффициент множественной корреляции; F – критерий Фишера; t – коэффициент Стьюдента; N – объем выборки. Если расчетное значение больше критического (табличного), то параметр статистически значим, что видно из таблицы. Это показывает, что уравнения (1), (2) статистически значимы.

На втором этапе проведен анализ изменения технологических параметров на изменение механических свойств. Экспериментальные режимы воздушного охлаждения арматурного проката на линии «Стелмор» приведены в табл. 2.

После производства арматуры № 8 и 10 класса прочности А500С был осуществлен отбор проб для определения предела текучести и временного сопротивления разрыву по следующей схеме:

1. Удаление неохлажденных витков согласно расчетам программы слежения.
2. Отбор 5, 15, 30 витка от начала и конца исследуемой бухты.
3. Каждый исследуемый виток разделен на четыре равные части по длине окружности.

По результатам механических испытаний были получены зависимости изменения временного сопротивления разрыву и предела текучести от изменения параметров перемещения на линии «Стелмор», а также мощности охлаждения при постоянстве всех остальных технологических параметров (рис. 4–7). Результаты исследования микроструктуры образцов приведены на рис. 8, 9.

Анализ микроструктуры показывает, что режим №2 обеспечивает устойчивое наличие равномерно-го кольца самоотпуска в отличие от режима №1. Сердцевина арматуры независимо от диаметра после структурных превращений по микроструктуре также различна, где продуктами данного превращения являлись разные структурные составляющие:

- Режим №1 – перлит + феррит + мартенсит отпуска (рис. 8, а).
- Режим №2 – феррит + бейнит + мартенсит отпуска (рис. 8, б).

Таблица 2. Экспериментальные режимы двухстадийного охлаждения арматурного проката

Класс прочности	Номер профиля	Вентиляторы		Скорость секторов рольганга		Положение крышек роликового транспортера по номерам
		номер рабочих вентиляторов	мощность включения каждого вентилятора, %	скорость транспортера витков, м/с	степень превышения (+) / занижения (-) скорости транспортирующего витки рольганга по секторам (№) / %*	
Эксперимент, режим № 1						
A500C	10	1-5	50	0,40-0,46	2-14/2, 15-18/0, 19/(-30), 20/2	1-32 открыты
Эксперимент, режим № 2						
A500C	10	1-5	25	0,8	2-14/4, 15-18/0, 19/(-30), 20/2	1-32 открыты
Эксперимент, режим № 1						
A500C	8	1-5	50	0,40-0,46	2-14/2, 15-18/0, 19/(-30), 20/2	1-32 открыты
Эксперимент, режим № 2						
A500C	8	1-5	20	0,8	2-14/5, 15-18/0, 19/(-30), 20/2	1-32 открыты

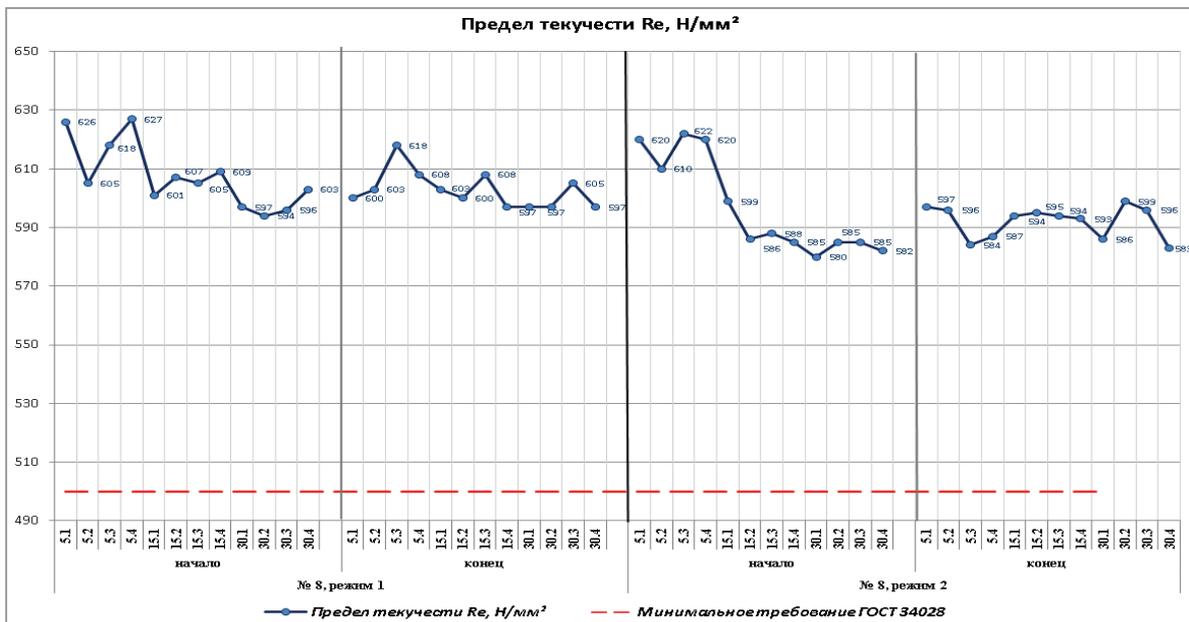


Рис. 4. Изменение предела текучести на арматуре № 8 класса прочности A500C

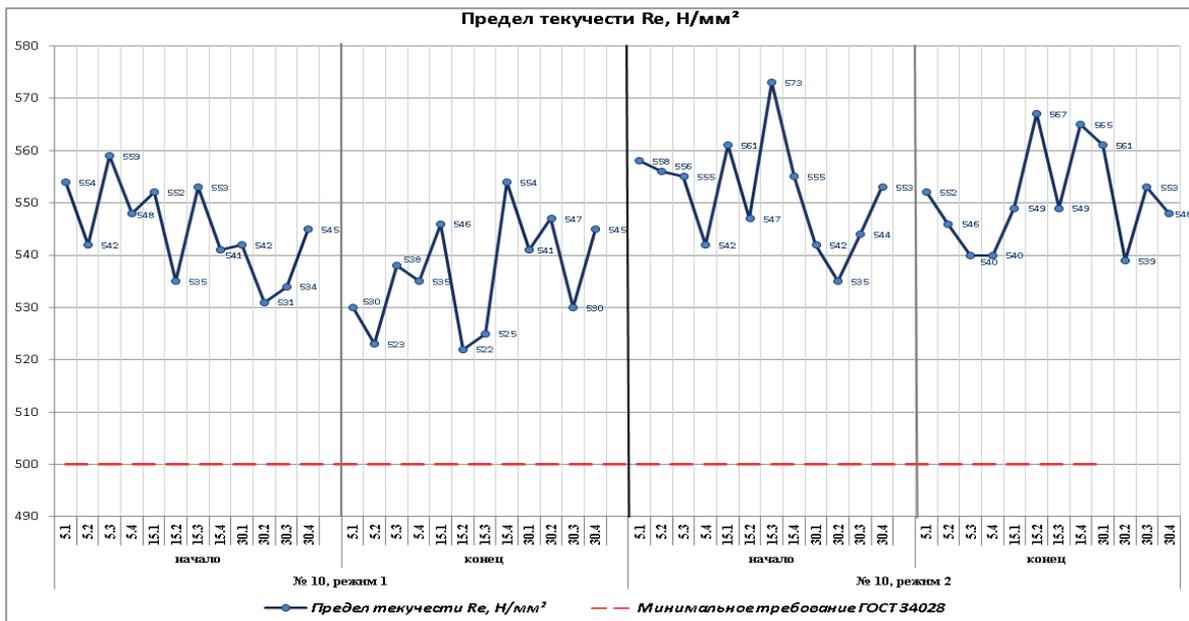


Рис. 5. Изменение предела текучести на арматуре № 10 класса прочности A500C

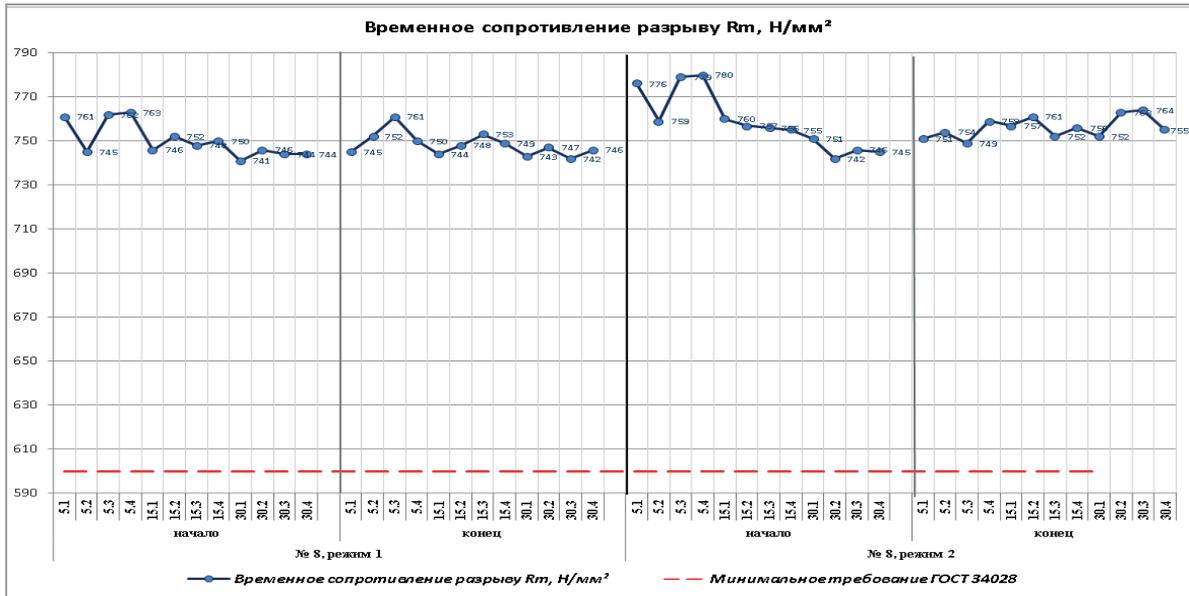


Рис. 6. Изменение временного сопротивления разрыву на арматуре № 8 класса прочности А500С



Рис. 7. Изменение временного сопротивления разрыву на арматуре № 10 класса прочности А500С



а



б

Рис. 8. Кольцо самоотпуска: а – режим №1 для арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм класса прочности А500С. ×100; б – режим № 2 для арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм класса прочности А500С. ×100

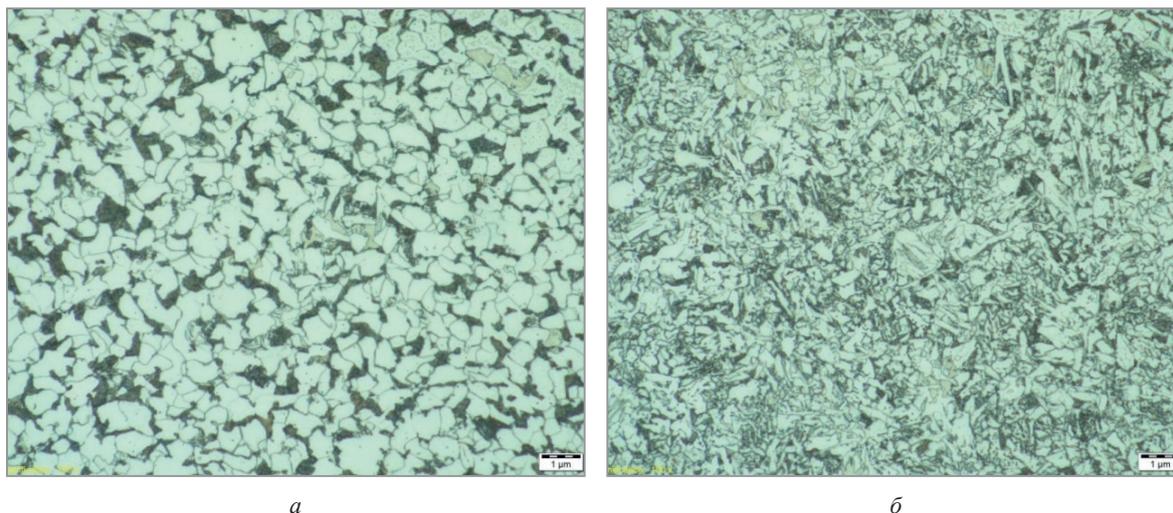


Рис. 9. Основная микроструктура арматуры (1/2 R и центр):

a – режим №1 для арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм класса прочности А500С. ×100;
б – режим №2 для арматурного проката номинальным диаметром 8 и 10 мм класса прочности А500С. ×500

Анализ данных в результате проведенных исследований по изменению технологических параметров работы линии «Стелмор» дает возможность определить температуру витка (в центре и с краю) арматуры в любой точке линии «Стелмор», благодаря чему полученные регрессионные уравнения можно считать достоверными и в дальнейшем позволят разрабатывать эффективные режимы охлаждения.

Выводы

1. Полученные регрессионные уравнения позволяют выполнить расчет режимов подачи воздуха вентиляторами по всей дистанции рольганга в зависимости от требуемой скорости охлаждения арматурного проката или прогнозировать динамику изменения температуры.
2. Изучен и выполнен анализ особенностей технологического процесса двухстадийного охлаждения катанки в условиях стана 370/150.
3. Изучен и проанализирован процесс воздушного охлаждения арматуры на 2-й стадии на рольганге Стелмора.
4. Выполнены измерения температур на вентиляторе № 1–6 при разных режимах его работы.
5. Определена математическая зависимость изменения температуры катанки на вентиляторе № 1–6 в зависимости от его подачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сычков, А.Б.** Совершенствование технологии производства арматурного проката в бунтах / А.Б. Сычков // *Сталь*. – 1995. – № 2. – С. 37–39.
2. **Сычков, А.Б.** Технологические особенности производства арматурного проката широкого назначения / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 499 с.
3. Формирование микроструктуры и механических свойств арматурного проката в бунтах из двух- и мультифазной стали / А.Б. Сычков [и др.] // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2023. – Т. 21. – № 4. – С. 70–80.
4. **Савченко, С.А.** Совершенствование технологического процесса горячей прокатки шарикоподшипниковых сталей в условиях стана 370/150 ОАО «БМЗ – УКХ «БМК» / С.А. Савченко // *Беларусь в современном мире: материалы XII Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Гомель, 16–17 мая 2019 г.* – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2019. – С. 282–285.
5. Влияние структуры бунтового проката из подшипниковой стали на его структуру и поверхностное обезуглероживание после сфероидизирующего отжига / С.А. Савченко [и др.] // *Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки*. – 2022. – № 21. – С. 133–144.
6. Влияние исходной структуры бунтового проката из подшипниковой марки стали на равномерность получения структуры после сфероидизирующего отжига / С.А. Савченко [и др.] // *Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и эконом. информации*. – 2023. – Т. 79. – № 3. – С. 251–260.
7. Особенности формирования мелкодисперстной структуры бунтового проката подшипниковой стали / С.А. Савченко [и др.] // *Черные металлы*. – 2024. – № 4. – С. 65–73.

REFERENCES

1. **Sychkov A.B.** Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva armaturnogo prokata v buntah [Improving the technology of production of rolled reinforcement in coils]. *Stal' = Steel*, 1995, no. 2, pp. 37–39.

2. **Sychkov A. B., Zhigarev M. A., Perchatkin A. V.** *Tehnologicheskie osobennosti proizvodstva armaturnogo prokata shirokogo naznachenija* [Technological features of production of reinforcing rolled products for a wide range of purposes]. Magnitogorsk, GOU VPO "MGTU" Publ., 2006, 499 p.
3. **Sychkov A. B., Nesterenko A. M., Zavalishhin A. N. et. al.** Formirovanie mikrostruktury i mehanicheskikh svojstv armaturnogo prokata v buntah iz dvuh- i mul'tifaznoj stali [Formation of microstructure and mechanical properties of reinforcing bars in coils of two- and multiphase steel]. *Vestnik MGTU im. G. I. Nosova = Bulletin of Moscow State Technical University named after G. I. Nosov*, 2023, no. 4, vol. 21, pp. 70–80.
4. **Savchenko S. A.** Sovershenstvovanie tehnologicheskogo processa gorjachej prokatki sharikopodshipnikovyh stalej v usloviyah stana 370/150 OAO "BMZ – UKKH "BMK" [Improving the technological process of hot rolling of ball bearing steels in the conditions of mill 370/150 of OJSC "BSW – MCH "BMC"]. *Belarus' v sovremennom mire: materialy XII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh, Gomel', 16–17 maja 2019 g. = Belarus in the modern world: materials of the XII International scientific conference of students, master's students, postgraduates and young scientists, Gomel, May 16–17, 2019. Gomel'*, GGTU im. P. O. Suhogo Publ., 2019, pp. 282–285.
5. **Savchenko S. A., Kovaleva I. A., Guzova I. A., Sychkov A. B.** Vlijanie struktury buntovogo prokata iz podshipnikovoj stali na ego strukturu i poverhnostnoe obezугlerozhivanie posle sferoidizirujushhego otzhiga [Influence of the structure of rolled bearing steel on its structure and surface decarburization after spheroidizing annealing]. *Tehnologii metallurgii, mashinostroenija i materialoobrabotki = Technologies of metallurgy, mechanical engineering and materials processing*, 2022, no. 21, pp. 133–144.
6. **Savchenko S. A., Kovaleva I. A., Guzova I. A., Sychkov A. B.** Vlijanie ishodnoj struktury buntovogo prokata iz podshipnikovoj marki stali na ravnomernost' poluchenija struktury posle sferoidizirujushhego otzhiga [Effect of the initial structure of rolled stock from bearing grade steel on the uniformity of the obtained structure after spheroidizing annealing]. *Chernaja metallurgija. Bjulleten' nauchno-tehnicheskoy i jekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information.*, 2023, no. 3, vol. 79, pp. 251–260.
7. **Savchenko S. A., Kovaleva I. A., Astapenko I. V., Sychkov A. B.** Osobennosti formirovanija melkodisperstnoj struktury buntovogo prokata podshipnikovoj stali [Features of formation of finely dispersed structure of rolled bearing steel]. *Chernye metally = Ferrous metals*, 2024, no.4, pp. 65–73.