

УДК 621.785

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-7-302-96-100

*О. Б. Крючков, П. И. Маленко, А. В. Ярда, И. А. Грачев***ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА И МАССЫ ХОЛОДНЫХ СЛИТКОВ
НА ПАРАМЕТРЫ ИХ НАГРЕВА ПОД КОВКУ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail:olegk@vstu.ru

Качественный нагрев холодных слитков под ковку должен включать несколько периодов нагрева в печи: начальный, который должен устранять возникновение недопустимо больших температурных напряжений в слитке в упругой области и тем самым предотвращать образование трещин; период нагрева, в котором используется максимальная мощность печи для быстрого нагрева поверхности металла до температурыковки; и период нагрева, в котором происходит выравнивание температуры по сечению слитка для снижения полосчатости структуры и анизотропии механических свойств ковкого металла. С этой целью в работе с использованием математического пакета MathConnex (часть MathCad Pro) приводится разработка шестиступенчатого температурного режима нагрева слитков массой 3; 13,3; 31,75; 79,19 и 170,6 т из стали 20Х20Н14С2, 30ХН3А и 20. В работе приведено исследование влияния массы слитка и его максимального диаметра под прибылью на температуру всада; влияние максимальной температуры печи на температурное поле в слитке перед томильной зоной, суммарное время нагрева и время в различных зонах печи, в том числе томильной, отвечающей за формирование необходимого перепада температуры (max 50 °С) по сечению слитка перед ковкой.

Ключевые слова: нагрев холодного слитка, ковка, напряжения, время нагрева, температурное поле

*О. В. Kryuchkov, P. I. Malenko, A. V. Yarda, I. A. Grachev***INFLUENCE OF THE MATERIAL AND MASS OF COLD INGOTS
ON PARAMETERS OF THEIR HEATING FOR FORGING****Volgograd State Technical University**

High-quality heating of cold ingots for forging should include several heating periods in the furnace: the initial one, which should eliminate the occurrence of unacceptably high temperature stresses in the ingot in the elastic region and thereby prevent the formation of cracks; a heating period in which the maximum furnace power is used to quickly heat the metal surface to the forging temperature; and a heating period in which the temperature is equalized along the cross-section of the ingot to reduce the banding structure and the anisotropy of the mechanical properties of the forged metal. To this end, using the MathConnex mathematical package (part of MathCad Pro), a six-stage temperature regime for heating ingots weighing 3; 13.3; 31.75; 79.19 and 170.6 tons made of steel 20X20H14X2, 30KHN3A and 20 is developed. The paper presents a study of the effect of the mass of the ingot and its maximum diameter under the profit on the temperature of the rider; the influence of the maximum furnace temperature on the temperature field in the ingot in front of the melting zone, the total heating time and the time in various zones of the furnace, including the melting zone, responsible for the formation of the required temperature range (max 50 °C) over the ingot section before forging.

Keywords: heating of a cold ingot, forging, stresses, heating time, temperature field

Режим нагрева стальных холодных слитков в камерных печах [1–6], в частности под ковку, включает наличие нескольких зон: начальной, в который нагрев должен проходить с невысокой скоростью с целью недопущения возникновения значительной разницы температуры между поверхностью и центром слитков, которая может способствовать появлению температурных напряжений и трещин в металле, особенно в слитках большой массы и низким коэффициентом теплопроводности; зоны печи, в которой происходит форсированный нагрев слитков до конечной температуры поверхности, при которой происходит обработка давлением; и томильной зоны печи, в которой достигается выравнивание температуры по сечению слитка перед пластической деформацией, которая должна быть < 50 °С [7]. Использование благопри-

ятного режима нагрева приводит к оптимизации времени нагрева садки, снижению энергетических затрат, повышению производительности печного агрегата, а также – снижению угара и обезуглероживания стальных слитков.

Авторы работ [8, 9] провели усовершенствование температурного режима нагрева холодных слитков в печи с выкатным подом с использованием вычислительной техники, а именно математического пакета MathConnex (часть MathCad Pro) с добавлением инструмента Excel.

Целью настоящей работы было исследование: влияния материала, массы слитка и его максимального диаметра под прибылью на начальную температуру печи (температуру «всада»); влияния максимальной температуры печи на температурное поле в слитке перед томильной зоной и время нагрева заготовок в различ-

ных зонах печи, в том числе томильной, отвечающей за формирование необходимого перепада температуры (max 50 °C) по сечению слитка перед ковкой.

Материалом для исследования служили слитки из стали 20Х20Н14С2, 30ХН3А и 20 мас-сой 3; 13,3; 31,75; 79,19 и 170, 6 т. Выбор исследуемых марок стали был вызван существенно отличающимися значениями теплопроводности и температуропроводности, оказывающими существенное влияние на температурное поле и время нагрева слитков.

В качестве методики исследования был использован математический пакет MathConnex (часть MathCad Pro) [11, 12], включающий блок Excel [10] для решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы. Расчеты допустимого перепада температуры в нагреваемом слитке в начале нагрева, когда металл находится в упругой области, рассчитывают [13, 14] по формуле (1)

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{1,4 \cdot \sigma_{\text{в}}}{E \cdot \beta},$$

где $\Delta t_{\text{доп}}$ – допустимый перепад температуры в нагреваемом слитке, °C; $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности литого слитка, МПа; E – модуль упругости нагреваемого металла, МПа; β – коэффициент объ-

емного расширения нагреваемого металла, K⁻¹.

Расчеты действительного перепада температуры и температурного поля в исследуемых слитках перед ковкой определяли по методикам, приведенным в работах [15, 16] с использованием номограмм для поверхности и центра цилиндра. Исходными данными для решения поставленных задач были выбраны: внутренние размеры топливной печи с выкатным подом и размеры исследуемых слитков; температуры печи и поверхности слитка для разных периодов нагрева; состав печной атмосферы в топливной печи; степень черноты нагреваемого металла и футеровки печи; а также – модули упругости, коэффициенты объемного расширения и временные сопротивления разрыву для стали 20Х20Н14С2, 30ХН3А и 20.

Исследуемый режим нагрева слитков представлен на рис. 1, который включает: начальный период с временем (τ_0), при котором металл загружается в печь с постоянной температурой (t_{n0}); времени нагрева слитка ($\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$), в течение которого поверхность металла достигает температурыковки при соответствующих температурах печи ($t_{n1cp}, t_{n2cp}, t_{n3cp}, t_{n4cp}$); времени томления ($\tau_{\text{том}}$), при котором перепад температуры в слитке перед ковкой снижается до необходимого (50 °C) при температуре печи ($t_{\text{том}}$).

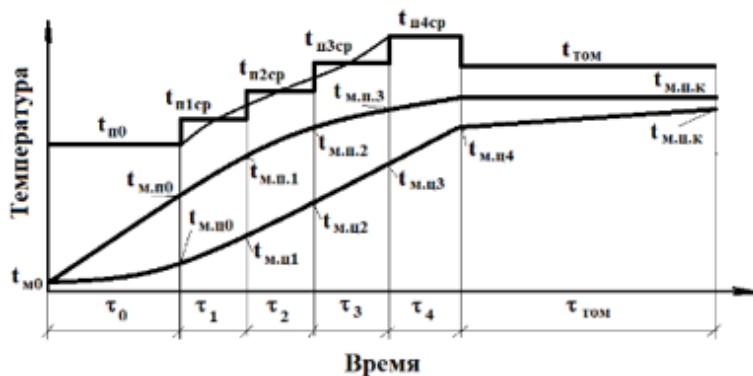


Рис. 1. Режим нагрева исследуемых слитков в топливной камерной печи

С использованием математического пакета MathConnex (часть MathCad Pro) [10–12] была разработана блок-схема, приведенная на рис. 2, которая включает блок с исходными данными (Исх.-дан); блоки (0-0; 1-1; 2-2; 3-3; 4-4), в которых происходит расчет теплотехнических параметров металла (толщины нагреваемого слоя, теплоемкости, теплопроводности, плотности, суммарного коэффициента теплоотдачи,

времени нагрева), а также – расчетные блоки (0; 1; 2; 3; 4) – для определения температурного поля в исследуемых слитках.

Стрелки на блок-схеме указывают направление перемещения исходных и расчетных данных между блоками, а цифровые данные – параметры, рассчитанные в соответствующих блоках. На рис. 3 представлен блок для расчета температурного поля в исследуемых слитках.

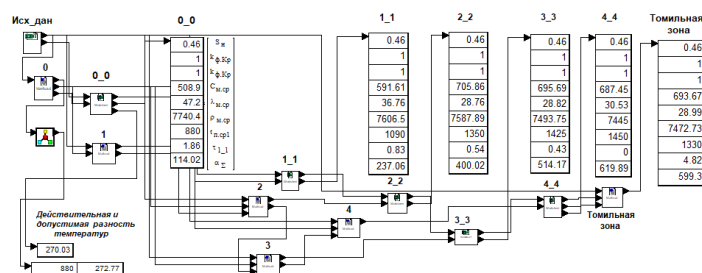


Рис. 2. Блок-схема для расчета теплотехнических параметров нагреваемого металла, времени его нагрева и температурного поля

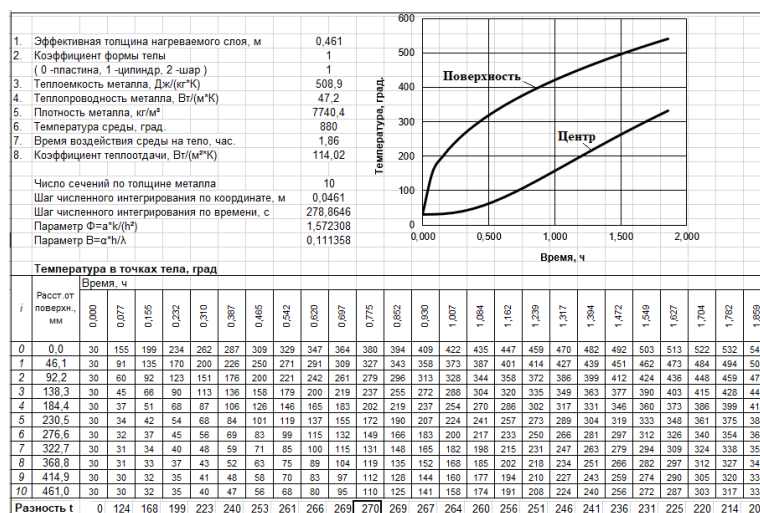


Рис. 3. Блок для расчета температурного поля для исследуемых слитков

В таблице для слитков различной массы из стали 20Х20Н14С2 с использованием рис. 1–3 приведены данные о температурах «всада», при которых происходит загрузка слитков различной массы в разогретую печь (0-0) и время его нагрева; температуры печи в каждом интервале нагрева и время нагрева слитков; температуры поверхности и центра в начале томильной зоны и суммарное время нагрева слитков.

Из рис. 4 следует, что с повышением масс и максимальных диаметров слитков температура, при которой слитки должны загружаться в печь (температура «всада») снижается. Высокие значения достоверности аппроксимации для масс слитков – 0,9886 и max диаметров – 0,9772 говорят о достаточно точном описании полученных уравнений в результате моделирования нагрева.

Результаты расчета параметров слитков различной массы из стали 20Х20Н14С2

Масса слитка, т	Температура (0-0) «всада»/ время, °С/ч	1 интервал (1-1), температура/ время, °С/ч	2 интервал (2-2), температура/ время, °С/ч	3 интервал (3-3), температура/ время, °С/ч	4 интервал (4-4), температура/ время, °С/ч	Томильная зона, температура/ время, °С/ч	Температура поверхности и центра в начале томильной зоны, °С	Время нагрева суммарное, ч
3	725/2	791/1	922/1	1083/1	1250/1,24	1220/0,74	1170/1010	6,95
		797/1	941/1	1114/1	1300/0,16	1220/0,797	1170/983	5,95
		803/1	959/1	1146/1	1350/0,09	1220/0,75	1170/994	5,84
		809/1	978/1	1177/1	1400/0,05	1220/0,7	1170/1012	5,75
		816/1	997/1	1208/1	1450/0,02	—	1170/1030	5,02
		822/1	1016/1	1239/0,917	—	—	1170/	4,917
13,3	595/2	677/2	841/2	1034/2	1250/1,36	1220/2,62	1170/925	11,98
		683/2	859/2	1066/2	1300/0,58	1220/2,98	1170/842	11,56
		689/2	878/2	1097/2	1350/0,25	1220/3,05	1170/822	11,30
		696/2	897/2	1128/2	1400/0,12	1220/3,03	1170/827	11,15
		762/2	916/2	1159/2	1450/0,08	1220/2,97	1170/844	11,05
		708/2	934/2	1191/2	1500/0,05	1220/2,9	1170/862	10,95

Окончание таблицы

Масса слитка, т	Темпера- тура (0-0) «всада»/ время, °C/ч	1 интервал (1-1), темпера- тура/время, °C/ч	2 интервал (2-2), темпера- тура/время, °C/ч	3 интервал (3-3), темпера- тура/время, °C/ч	4 интервал (4-4), темпера- тура/время, °C/ч	Томильная зо- на, темпера- тура/ время, °C/ч	Температура по- верхности и цен- тра в начале то- мильной зоны, °C	Время нагрева суммарное, ч
31,75	545/2	639/2,5	828/2,5	1047/2,5	1300/1,49	1220/5,9	1170/739	16,89
		646/2,5	847/2,5	1078/2,5	1350/0,74	1220/6,18	1170/674	16,42
		652/2,5	866/2,5	1109/2,5	1400/0,36	1220/6,26	1170/650	16,12
		658/2,5	884/2,5	1141/2,5	1450/0,17	1220/6,27	1170/646	15,94
		664/2,5	903/2,5	1172/2,5	1500/0,1	1220/6,24	1170/656	15,84
79,19	4302	539/3	756/3	1004/3	1300/1,49	1220/11,98	1170	24,47
		545/3	775/3	1035/3	1350/0,69	1220/12,2	1170/453	23,89
		551/3	794/3	1066/3	1400/0,31	1220/12,26	1170/440	23,57
		558/3	813/3	1098/3	1450/0,12	1220/12,3	1170/430	23,42
		564/3	831/3	1129/3	1500/0,1	1220/12,26	1170/439	23,70
170,6	410/2	521/3	744/3	996/3	1300/4,42	1220/22,96	1170/320	36,38
		528/3	763/3	1028/3	1350/1,07	1220/24,22	1170/247	36,29
		534/3	781/3	1059/3	1400/0,47	1220/24,7	1170/220	36,17
		540/3	800/3	1090/3	1450/0,1	1220/24,9	1170/200	36,00
		546/3	819/3	1121/3	1500/0,07	1220/24,92	1170/208	35,99

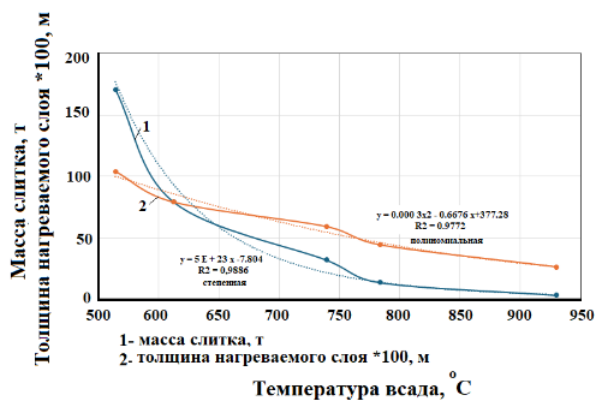


Рис. 4. Влияние массы и толщины нагреваемого слоя слитков из стали 20Х20Н14С на температуру «всада»

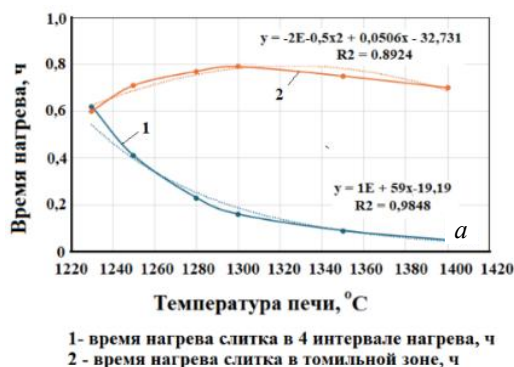
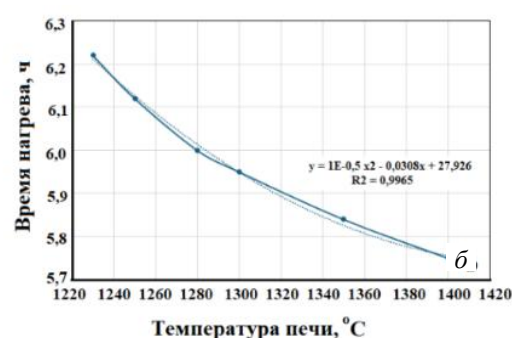


Рис. 5. Влияние максимальной температуры печи на время нагрева слитка массой 3 т из стали 20Х20Н14С2 перед томильной зоной и суммарное время

На рис. 5 представлено влияние максимальной температуры печи на время нагрева слитка массой 3 т из стали 20Х20Н14С2: с увеличением тах температуры печи время томления металла возрастает (рис. 5, а, кривая 2), а время нагрева слитка до томильной зоны снижается (рис. 5, а, кривая 1). Результирующая вышеупомянутых времен нагрева, приведенная на рис. 5, б, показывает снижение суммарного времени нагрева слитков.



учитывающим коэффициент теплопроводности (λ_m), теплоемкость (C_m) и плотность (ρ_m) металла ($a_m = \lambda_m / (C_m \cdot \rho_m)$), способствуют возрастанию температуры «всада» соответственно для сталей марок 20Х20Н14С2, 30ХН3А и 20.

На рис. 6 показано влияние коэффициента температуропроводности сталей различных марок и масс на температуру «всада»: более высокие значения коэффициента теплопроводности, являющегося комплексным показателем,

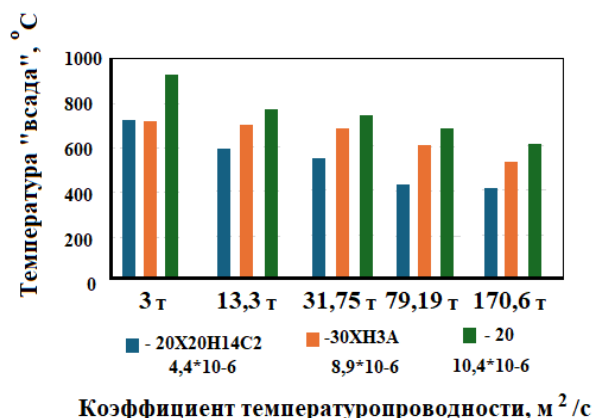


Рис. 6. Влияние коэффициента температуропроводности на температуру «всада» слитков различного развеса и марок стали

Выводы

На основании разработанного рационального режима нагрева холодных слитков различной массы и марок стали с использованием математического пакета MathConnex (часть MathCad Pro) установлено: с повышением масс и максимальных диаметров слитков температура, при которой слитки должны загружаться в печь (температура «всада»), снижается; с увеличением тах температуры печи время томления металла возрастает, а время нагрева слитка до томильной зоны снижается, что способствует снижению суммарного времени нагрева слитков; стали с более высокими значениями коэффициента температуропроводности, являющегося комплексным показателем, учитывающим коэффициент теплопроводности (λ_m), теплоемкость (C_m) и плотность (ρ_m) металла, имеют более высокую температуру «всада» соответственно для сталей марок 20, 30XНЗА и 20X20H14C2; использование предложенного режима нагрева холодных слитков способствует получению годной заготовки без трещин, оптимизации времени нагрева слитков, снижению расхода топлива, повышению производительности печи, снижению угара металла и полосчатости структуры ковальной заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панферов, В. И. Об экономичном управлении нагревом металла в промышленных печах / В. И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 71–80.
2. Парсункин, Б. Н. Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Д. Ю. Жадинский, А. У. Ахметова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2015. – № 3. – С. 89–96.
3. Панферов, В. И. К решению задачи об управляемости нагрева металла в промышленных печах / В. И. Панферов, С. В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 79–85.
4. Андреев, С. М. Прогнозирование времени нагрева заготовок в условиях нестационарного режима работы методических печей / С. М. Андреев // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 3(36). – С. 35–40.
5. Смирнова, Д. А. Режимы охлаждения, термостатирования нагрева слывов на линии «машина непрерывного литья заготовок-термостат-нагревательная печь» / Д. А. Смирнова, С. В. Обушенко // Вестник науки и образования. – 2019. – № 3(57). – Часть 1. – С. 15–19.
6. Lee D. E., Kim M. Y. Optimum residence time for steel productively and energy saving in a hot rolled reheating furnace // Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 27, is. 9, pp. 2869–2877 (2013).
7. Семенов, Е. И. Ковка и штамповка : справочник. В 4 т. / Е. И. Семенов ; под ред. д-ра тех. наук Д. Р. Матвеева. – Москва, 1985.
8. Крючков, О. Б. Выбор рационального режима нагрева крупных холодных слитков под обработку металлов давлением с использованием компьютерного моделирования / О. Б. Крючков, П. И. Маленко, Л. Г. Саранин, А. Е. Болдырев. Черные металлы (Chernye Metally). – 2023. – № 6. – С. 17–23.
9. Крючков, О. Б. Расчет температурного напора в томильной зоне топливной печи при нагреве холодных слитков под ковку / О. Б. Крючков, П. И. Маленко // Черные металлы (Chernye Metally). – 2024. – № 11. – С. 74–80. – DOI: 10.17580/chm.2024.11.13
10. Крючков, О. Б. Влияние расположения заготовок в камерных печах на время их нагрева и перепад температуры по сечению при холодном и горячем посяде / О. Б. Крючков, А. В. Крохалев, А. А. Белов, П. И. Маленко // Черные металлы. – 2021. – № 6. – С. 20–26.
11. Крючков, О. Б. Использование математического пакета MathConnex для теплотехнического расчета нагревательных печей / О. Б. Крючков, Н. И. Габельченко, П. И. Маленко, Л. Г. Саранин // Черные металлы. – 2019. – № 12. – С. 52–60.
12. Моделирование и теплотехнические расчеты процессов в нагревательных и термических печах [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Ч. 2: Использование вычислительной техники для расчета времени нагрева металлических изделий / О. Б. Крючков, В. М. Волчков, А. В. Крохалев; ВолгГТУ. – Изд. 2-е, стер. – Волгоград: ВолгГТУ, 2017. – 184 с. – ISBN 978-5-9948-2434-4.
13. Кривандин, В. А. Металлургические печи / В. А. Кривандин, Б. Л. Марков. – М. : Металлургия, 1977. – 464 с.
14. Мاستрюков, Б. С. Теория, конструкция и расчеты металлургических печей. В 2 т. Т. 2. Расчеты металлургических печей / Б. С. Мастрюков. – М. : Металлургия, 1986. – 376 с.
15. Cinnarizine, A. A mixed variational method for linear coupled thermoelastic analysis / A. Cannarozzi, F. Ubertini // International Journal of Solids and Structures. 2001. № 38. P. 717 – 739.
16. Bathe, K. J. The inf-sup condition and its evaluation for mixed finite element methods / K.J. Bathe // Computers & Structures. 79. 2001. P. 243 – 252.
17. Металлургическая теплотехника : учеб. для студ. металлург. спец. вузов. Т. 1: Теоретические основы / под ред. В. А. Кривандина. – М. : Металлургия, 1986. – 422 с.
18. Металлургическая теплотехника : учеб. для студ. металлург. спец. вузов. Т. 2: Конструкция и работа печей / под ред. В. А. Кривандина. – М. : Металлургия, 1986. – 590 с.