

Методика расчета параметров раскроя слябов перед порезкой на основе модели линейной усадки длины сляба

З.К. Кабаков, Д.И. Габелая, А.А. Чуев

Череповецкий государственный университет, Череповец

Аннотация: Современному металлургическому производству необходимо не только обеспечивать высокое качество выпускаемой продукции, но и быть энергоэффективным. Для достижения данной цели необходимо свести к минимуму перерасход ресурсов, в частности, на этапе непрерывной разливки. В данной работе предложена методика расчета параметров раскроя сляба перед порезкой, позволяющая уменьшить расход металла и повысить выход годного. Данная методика создана на основе математической модели усадки сляба при охлаждении, и может быть использована для автоматизации рабочего места оператора машины газовой резки цеха разливки конвертерной стали.

Ключевые слова: усадка, сляб, математическая модель, коэффициент раскроя, порезка, теплофизические свойства.

Введение

Одной из актуальных проблем современного металлургического производства, в частности, непрерывной разливки является точное прогнозирование фактических размеров слябов при разливке на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Непрерывная разливка на МНЛЗ в настоящее время является наиболее ресурсоэффективным способом разливки металла, позволяющим получать стальные заготовки высокого качества [1].

После выхода сляба из роликовой зоны прямолинейного участка зоны вторичного охлаждения (ЗВО), он, подвергаясь постепенному охлаждению, поступает на машину газовой или лазерной резки, где производится порезка сляба на мерные длины, при этом в настоящее время все чаще используется именно лазерная порезка слябов, вследствие очевидного преимущества в точности и производительности [2]. Далее, порезанные слябы транспортируются на склад с помощью рольганг-тележки. На складе происходит окончательное охлаждение готовых слябов и их хранение. Непрерывно литые слябы раскладываются на стеллажах поплавно в штабеля высотой не более 4 м с промежутком не менее 300 мм. Удаление

дефектов на слябах производится с помощью ручных огневых резаков. Приемка слябов производится при температуре не выше 60°C.

После порезки на мерные длины сляб имеет температуру порядка 1000-1100°C и охлаждается до комнатной температуры. Этот процесс приводит к фактически неконтролируемому сокращению его линейных размеров вследствие усадки металла, что влечет перерасход металла и финансовые убытки.

Как правило, технологические инструкции цехов непрерывной разливки стали содержат фиксированные коэффициенты раскроя слябов на мерные длины, все зависимости от марки стали и температуры порезки. К примеру, для того, чтобы фактическая мерная длина сляба после полного охлаждения с учетом усадки была не меньше требуемой заказчиком, при раскрое слябов перед порезкой в горячем состоянии планируемую мерную длину умножают на коэффициент 1,014 для всех случаев независимо от марки стали и режимов охлаждения. Таким образом, средняя величина линейной усадки сляба от момента порезки до передачи заказчику полагается равной 1,4%.

При этом основная проблема заключается в несоответствии между плановым и фактическим размерами сляба: зачастую получаемый (фактический) размер оказывается больше требуемого и при прокатке излишки металла отправляются в обрезь, далее – в скрапное отделение и обратно на переплавку, что увеличивает производственные потери. Для того чтобы фактическая длина сляба соответствовала требуемой заказчиком (плановой), при раскрое слябов перед порезкой в горячем состоянии, планируемую мерную длину умножают на специальный коэффициент, называемый коэффициентом раскроя k . Предполагается, что средняя величина линейной усадки сляба от момента порезки до передачи заказчику составит $(k \cdot 100\%) - 100\%$, при этом не учитывается тот факт, что усадка

стали зависят и от марки стали и от режимов охлаждения на МНЛЗ. Также необходимо знать температуру порезки, поскольку она оказывает существенное влияние на итоговый результат.

Таким образом, возникает необходимость в исследовании усадки слябов при охлаждении от момента порезки до полного охлаждения и выявлении закономерностей коэффициента раскрытия для сталей различных марок в зависимости от температуры порезки с целью создания математической модели прогнозирования фактических размеров сляба.

В настоящее время разработано большое количество математических моделей, описывающих процессы затвердевания и охлаждения непрерывнолитых заготовок на МНЛЗ, но наиболее простой и универсальной является модель, разработанная в ВНИИМТ [3]. На основе данной модели в последнее время разработано множество моделей, применяющихся для различных исследований и расчетов. Примерами подобных моделей являются математическая модель процесса формирования верхних слоев слитка [4], модель макроскопических особенностей важнейших фазовых превращений в процессе непрерывной разливки [5], модель процесса регулирования вторичного охлаждения [6, 7], математическая модель процесса деформирования непрерывнолитых стальных слябов [8], динамическая модель системы вторичного охлаждения для МНЛЗ [9], модель выпучивания корочки сляба между поддерживающими роликами [10] и др.

Многие из вышеперечисленных моделей хорошо отражают сущность наблюдаемых на практике процессов, однако по мере развития технической мысли и появления новых экспериментальных закономерностей они требуют существенной доработки и улучшения.

Математическая модель

Для решения этих задач, на основе ранее представленного способа определения усадки поперечного сечения сляба [11] разработали методику

расчета относительной скорости деформации всего поперечного сечения сляба в продольном направлении вдоль оси y :

$$\varepsilon_y = \frac{1}{S} \iint_S \alpha(T) \dot{T} dx dz, \quad (1)$$

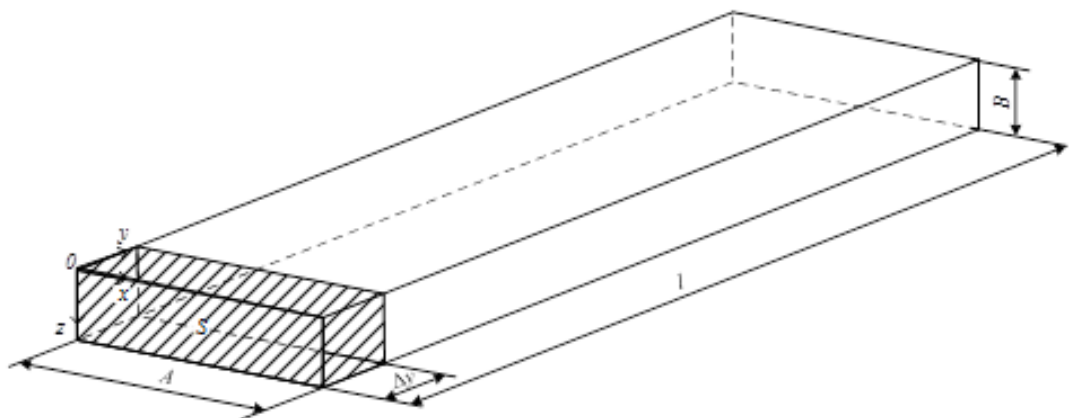
где S – площадь поперечного сечения; $\alpha(T)$ – коэффициент линейной усадки стали, зависящий от температуры; \dot{T} – скорость изменения температуры в точке (x, z) в момент времени t (рис. 1).

Для расчета температурного поля и усадки сляба в поперечном сечении в работе [11] использовали метод конечных разностей, согласно которому выполняли дискретизацию времени с шагом Δt и координат по ширине ($\Delta x = A/N_x$), ширине ($\Delta y = l/N_y$) и толщине ($\Delta z = B/N_z$).

Абсолютная величина усадки длины сляба за время t :

$$\Delta l^n = \int_0^t \int_0^l \frac{1}{S} \iint_S \alpha(T) \dot{T} dx dy dz dt, \quad (2)$$

где n – текущий индекс моментов времени.



A , l и B – ширина, длина и толщина сляба

Рис. 1. – Схема к расчету продольной усадки сляба

Относительная скорость деформации поперечного сечения k в момент времени $t^m = n \cdot \Delta t$ в конечно-разностном виде:

$$\varepsilon_k^n = \frac{1}{S^n} \sum_i \sum_j \alpha \left(\frac{T_{k,i,j}^n + T_{k,i,j}^{n-1}}{2} \right) \frac{T_{k,i,j}^n - T_{k,i,j}^{n-1}}{\Delta t} \Delta x \Delta z, \quad (3)$$

где $S^n = A(t^n) \cdot B(t^n)$; T^n и T^{n-1} – температура в текущий n и в предыдущий $n-1$ моменты времени.

Абсолютная усадка элемента Δy за время Δt в конечно-разностном виде:

$$\Delta l_k^n = \Delta y \cdot \varepsilon_k^n \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Абсолютная усадка всей длины сляба за время Δt в момент времени n :

$$\Delta l^n = \sum_{k=1}^{N_y} \Delta l_k^n, \quad (5)$$

где N_y – количество узлов дискретизации расчетной области по длине сляба.

Абсолютная усадка всей длины сляба к конечному моменту времени n_k :

$$\Delta l = \sum_{n=1}^{n_k} \Delta l^n. \quad (6)$$

Как уже было сказано выше, существенное влияние на конечный результат оказывает начальное тепловое состояние сляба, характеризуемое температурой порезки T^0 . В качестве T^0 будем задавать максимальную температуру по объему сляба.

Исследование процесса усадки длины сляба с помощью предложенной методики выполнено на основе разработанной ранее трехмерной модели охлаждения штабеля слябов [12].

Результаты моделирования

Расчет усадки выполнялся для трех марок стали: 08ПС, 09Г2С, 22ГЮ. Химический состав этих сталей, согласно анализу непосредственно перед разливкой, приведен в Таблице № 1.

Таблица № 1

Химический состав исследуемых сталей

Марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
08ПС	0,064	0,022	0,154	0,013	0,0066	0,03	0,019	0,034	0,033
09Г2С	0,106	0,7	1,35	0,014	0,0022	0,05	0,027	0,04	0,04
22ГЮ	0,218	0,22	1,24	0,011	0,0044	0,032	0,019	0,035	0,042

Теплофизические свойства сталей данных марок определяли с шагом 1°С в диапазоне 25-1150°С помощью аналитического программного пакета JMatPro, реализующего методику расчета фазовых диаграмм CALPHAD (аббр. от англ. CALculation of PHase Diagrams). Полученные данные по значениям удельной теплоёмкости, теплопроводности, плотности и коэффициента линейного расширения в зависимости от температуры сохраняли в массивы, которые потом загружали в трехмерную модель охлаждения штабеля, дополненную приведенной выше методикой расчета усадки длины сляба. Далее выполняли пересчет полученных значений линейной усадки сляба в коэффициент увеличения мерной длины (коэффициент раскроя) и на основе полученных данных вывели закономерность $k=k([\%C],T)$:

$$k = 0,9829 + 0,00003 \cdot T - (0,0009 - 0,000007 \cdot T) \cdot [\%C]. \quad (7)$$

Используя приведенную выше методику расчета линейной усадки, изучали сокращение длины слябов исследуемых марок стали 08ПС ([%C]=0,064), 09Г2С ([%C]=0,106) и 22ГЮ ([%C]=0,218; сечением 1200×250 мм с начальной температурой при порезке (T^0) в 800, 900, 1000 и 1100°С.

В Таблице № 2 указаны значения коэффициента раскроя, вычисленные с использованием предложенной методики для сталей исследуемых марок в диапазоне температур перед порезкой 800-1100°С. На рис. 2. представлены зависимости коэффициента раскроя k от температуры T и содержания углерода для исследуемых марок стали, рассчитанные по уравнению (7).

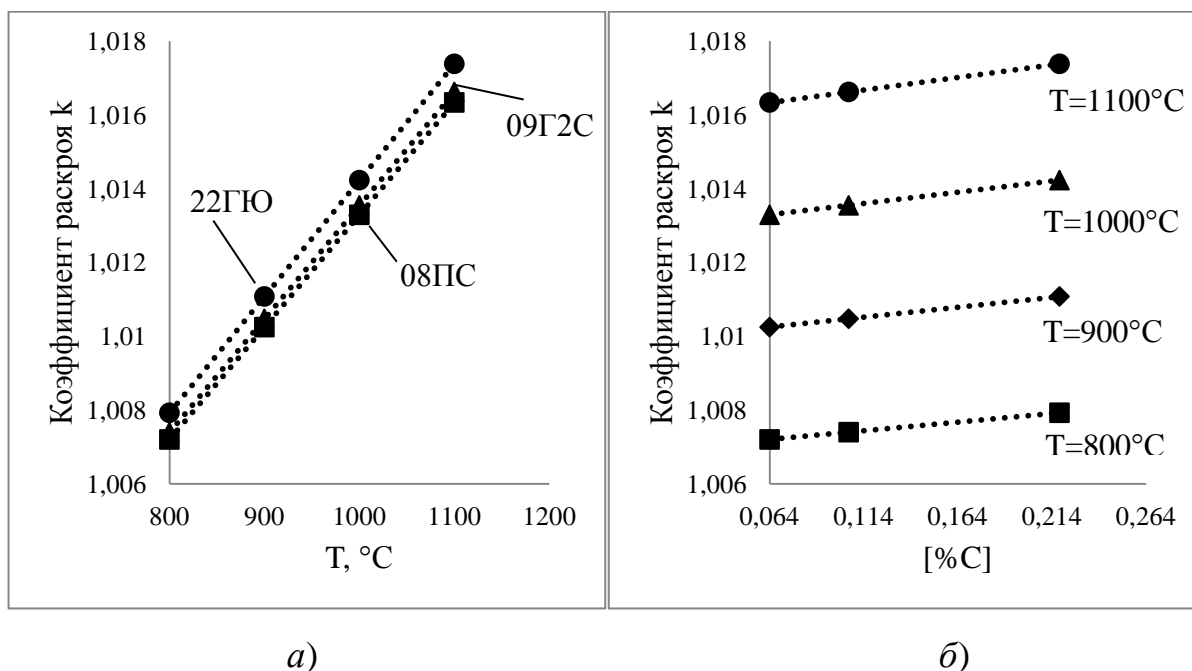


Рис. 2. – Зависимости коэффициента раскрытия k от температуры порезки (а) и концентрации углерода (б) в стали при охлаждении от температуры T^0 до 30°C

Таблица № 2

Значения коэффициента раскрытия для сталей марок 08ПС, 09Г2С, 22ГЮ в зависимости от температуры порезки

T, °C	800	900	1000	1100
08ПС	1,0072	1,0102	1,0133	1,0163
09Г2С	1,0073	1,0104	1,0135	1,0166
22ГЮ	1,0079	1,0111	1,0142	1,0174

С использованием аналитического программного пакета JMatPro (расчет теплофизических свойств) по данным Таблицы № 1 в интервале температур $25-1150^\circ\text{C}$ с шагом 1°C определены и представлены графически зависимости теплофизических свойств сталей исследуемых марок (08ПС, 09Г2С, 22ГЮ) от температуры: теплопроводность (рис. 3), теплоемкость (рис. 4), плотность (рис. 5), средний коэффициент усадки (рис. 6). Вид данных зависимостей позволяет сделать выводы о характере процессов, происходящих в стали при температурах, близких к температуре порезки.

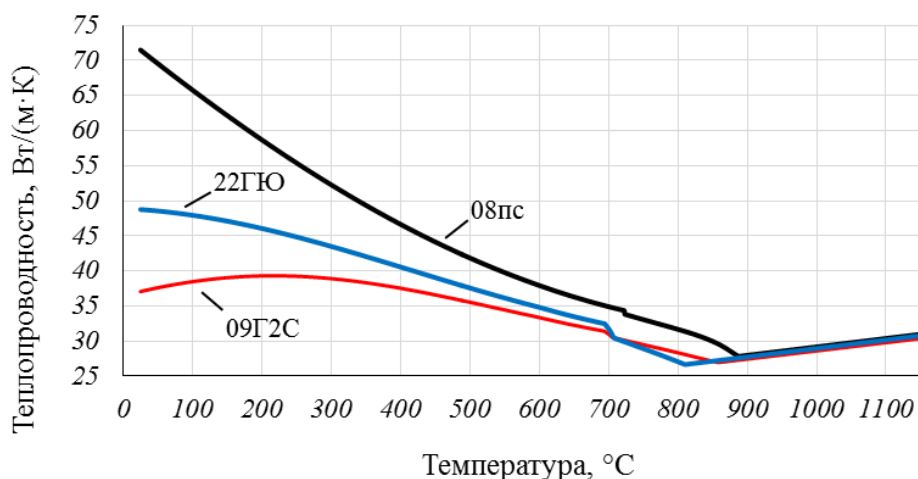


Рис. 3. – Зависимость теплопроводности от температуры

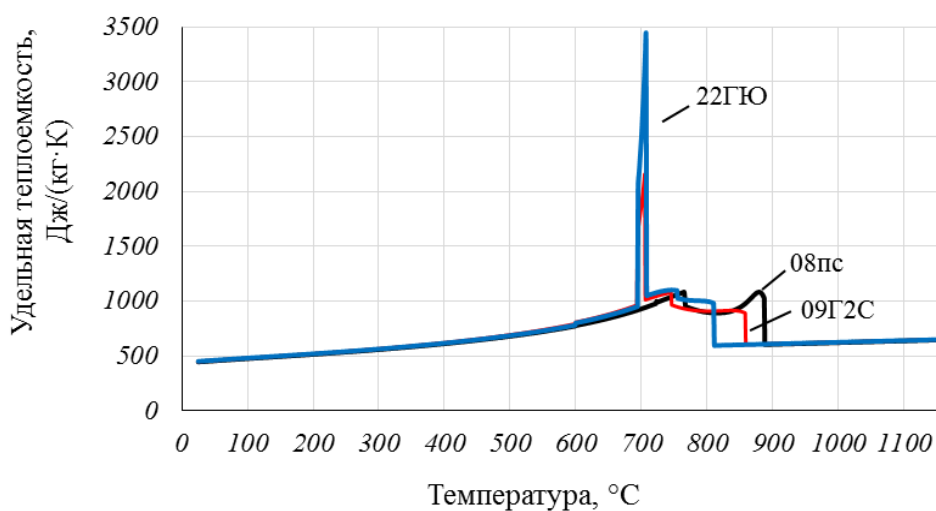


Рис. 4. – Зависимость удельной теплоемкости от температуры

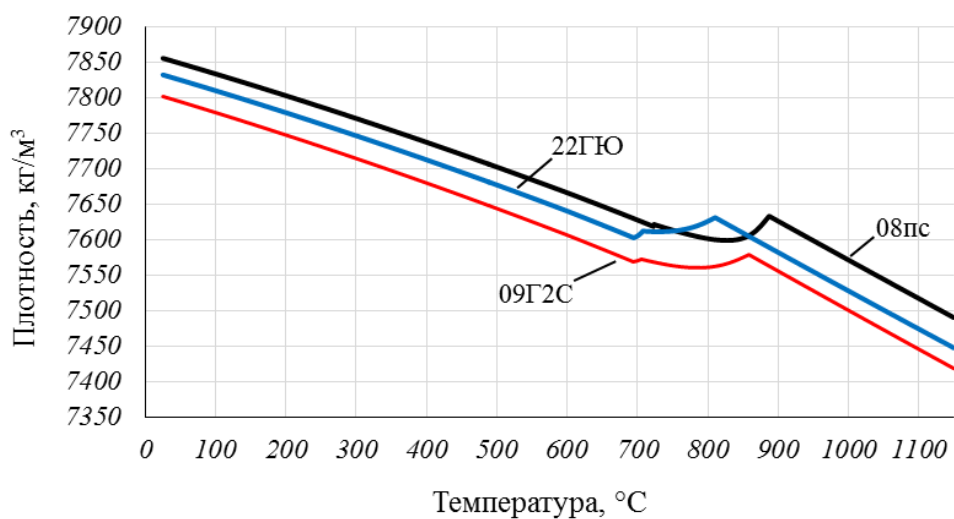


Рис. 5. – Зависимость плотности от температуры

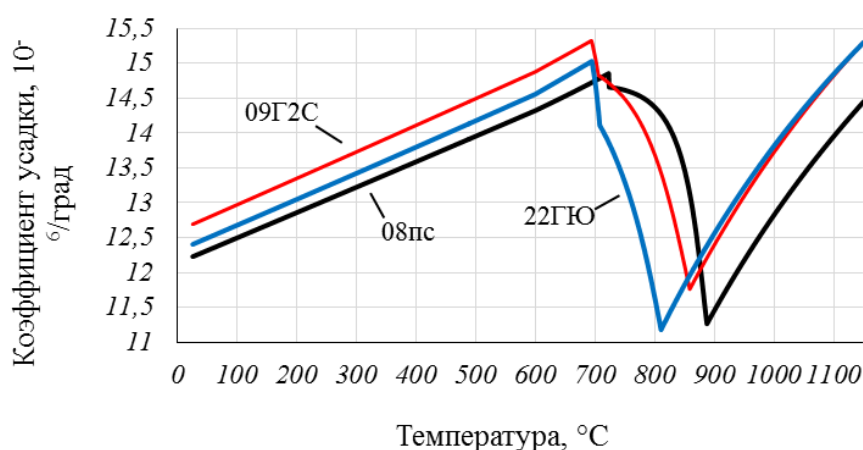


Рис. 6. – Зависимость среднего коэффициента усадки от температуры

Обсуждение

Проанализировав полученные результаты, выявили общие закономерности:

– чем меньше начальная температура, тем меньше величина линейной усадки. Однако зависимость меняется на противоположную в области температур полиморфного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ (700-900°C). В указанной области выявить зависимость усадки от температуры и концентрации углерода затруднительно;

– влияние химсостава на величину усадки существенно проявляется только при порезке при высоких температурах 1000-1100°C, при этом, чем меньше углерода в стали, тем меньше величина усадки;

– из рис. 3 – рис. 5 видно, что химсостав (в частности, концентрация углерода) значительно влияет на теплофизические свойства стали. В интервале температур полиморфного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ характер зависимостей теплофизических свойств от температуры существенно меняется, в частности, зависимость усадки от температуры приобретает обратный характер. При этом, в интервалах температур до 700°C и выше 900°C зависимость имеет явно выраженный прямой характер.

Поскольку данная особенность зависимости усадки влияет на результат моделирования, то сама модель построена для интервала температур порезки 800-1100°C.

Таким образом, на основе приведенных методики расчета линейной усадки сляба и зависимости коэффициента раскроя $k=f([\%C],T)$ (выражение (7)), может быть предложено техническое решение по автоматизации рабочего места оператора машины газовой резки (МГР) цеха разливки конвертерной стали современного металлургического предприятия в виде компьютерной программы (рис. 7). Данная программа позволяет вычислять значения коэффициента увеличения мерной длины с учетом известных данных по концентрации углерода и температуры сляба перед порезкой. По результатам моделирования производится порезка сляба на мерные длины с учетом рассчитанного коэффициента раскроя k .

Оператор МГР вводит в программу содержание углерода в стали для указанной плавки и среднюю температуру по сечению сляба перед порезкой. Далее оператор указывает требуемую заказчиком длину сляба $L_{\text{план}}$ и программа дает рекомендации по раскрою сляба в виде задаваемой на poste управления мерной длины $L_{\text{МГР}}=k \cdot L_{\text{план}}$, где коэффициент k определяется по формуле (7). Программа также позволяет визуализировать зависимость $k=k([\%C],T)$.

К примеру, требуется получить сляб мерной длины 10 м из стали 09Г2С. Руководствуясь предложенной методикой, нужно умножить это значение на коэффициент $k=1,0134$ при температуре порезки 1000°C и на коэффициент $k=1,0108$ – при температуре порезки 900°C, а не $k=1,014$, как требуется в большинстве технологических инструкций. Для стали 08ПС значения этого коэффициента составляют $k=1,0124$ и $k=1,01$ соответственно.

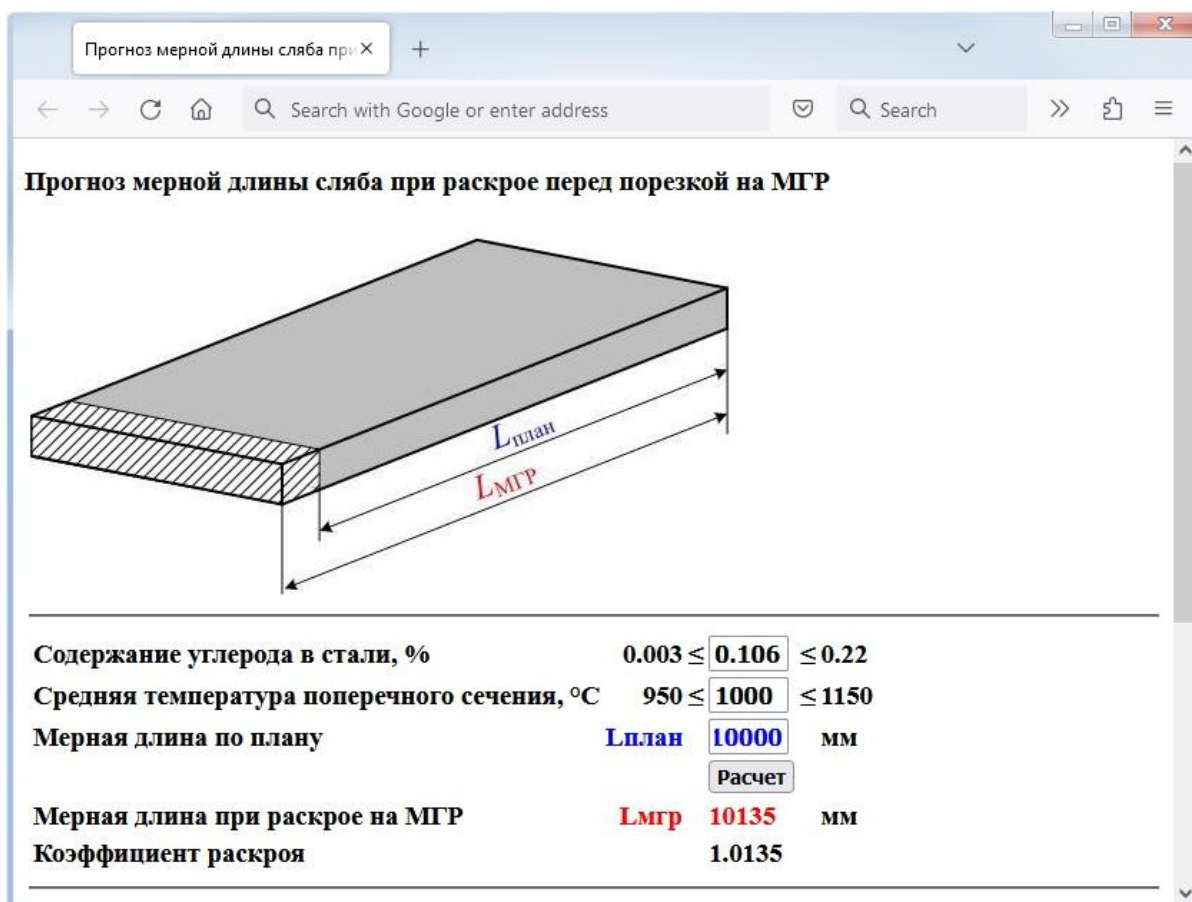


Рис. 7. – Интерфейс компьютерной программы для визуализации расчета коэффициента увеличения мерной длины сляба при охлаждении

Заключение

Таким образом, в статье предложен способ расчета значений линейной усадки мерной длины сляба после порезки при охлаждении от T^0 до 30°C . Данный способ использован для исследования сокращения мерной длины слябов при охлаждении. Выявлены прямые линейные зависимости значений абсолютной усадки мерной длины слябов различных марок сталей от температуры порезки при $T^0 > 800^\circ\text{C}$. Предложена зависимость коэффициента увеличения мерной длины k (коэффициента раскроя) от температуры порезки и концентрации углерода, которая может быть использована в цехе разливки конвертерной стали для снижения производственных издержек.

Литература

1. Кривоносов В.А., Митин А.С. Наблюдаемость и управляемость системы стабилизации уровней расплавленного металла на МНЛЗ // Инженерный вестник Дона. 2013. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1831.
 2. Бузало Н.А., Гайджуров П.П., Кожихов А.Г. Исследования сжатых перфорированных стоек и совершенствование их конструктивной формы // Инженерный вестник Дона. 2009. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2009/129.
 3. Самойлович Ю.А., Кабаков З.К. Учет эффекта релаксации напряжений при определении термических напряжений в отливке // Горение, теплообмен и нагрев металла: Сб. науч. тр. №24. М.: Metallургия. 1973. С. 100–113.
 4. Хасин Г.А. О математическом моделировании процесса формирования поверхностных слоев слитка // Известия вузов. Черная металлургия. 1987. №8. С. 133–135.
 5. Zou J., Tseng A.A. Modeling of macroscopic features of the most important phase transformations in the process of continuous casting of steel. Metallurgical and Materials Transactions A. 1992. №2. P.457–467. DOI: [10.1007/BF02801163](https://doi.org/10.1007/BF02801163).
 6. Девятов Д.Х., Пантелеев И.И. Определение коэффициентов теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ с помощью идентифицируемой математической модели // Известия вузов. Черная металлургия. 1999. №8. С. 62–65.
 7. Дюдкин Д.А., Токарев В.Л., Ильин А.А., Онопченко В.М., Курапин Б.С. Оптимизация режима охлаждения непрерывного слитка с помощью приближенной модели // Сталь. 1981. №9. С. 30–32.
-

8. Данилов В.Л., Кораблин А.И. Математическая модель деформирования непрерывнолитых стальных слябов // Известия вузов. Машиностроение. 1989. №12. С. 142–145.

9. Яукола М., Кивеля Э., Конттинен Ю., Лайтинен Э. Динамическая модель системы охлаждения для машин непрерывного литья заготовок // Сталь. 1995. №2. С. 25-29.

10. Okamura Kazuo. Buckling analysis of continuously cast slabs using a 3D plastic creep model // Tetsu To Hagane - Journal of The Iron and Steel Institute of Japan. 1987. №12. P. 175.

11. Кабаков З.К., Габелая Д.И. Исследование усадки слитка в кристаллизаторе в процессе непрерывной разливки стали // Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства: Материалы II Всероссийской научно-технической конференции. Череповец: ЧГУ. 2001. С. 53–55.

12. Кабаков З.К., Габелая Д.И., Грибкова Ю.В., Егоренкова С.В. Математическая модель охлаждения штабелей непрерывнолитых слябов на воздухе // Вестник Череповецкого государственного университета. Череповец: ЧГУ. 2007. №3. С. 83–84.

References

1. Krivonosov V.A., Mitin A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1831.

2. Buzalo N.A., Gajdzhurov P.P., Kozhixov A.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2009. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2009/129.

3. Samojlovich U.A., Kabakov Z.K. Uchet èffekta relaksacii napryazhenij pri opredelenii termicheskix napryazhenij v otlivke. [Consideration of the effect of stress relaxation when determining thermal stresses in a casting]. Gorenje, teploobmen i nagrev metalla: Sbornik nauchny`x trudov. №24. M.: Metallurgiya. 1973. pp. 100–113.

4. Xasin G.A. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. 1987. №8. pp. 133–135.
5. Zou J., Tseng A.A. Metallurgical and Materials Transactions A. 1992. №2. P. 457–467. DOI: 10.1007/BF02801163.
6. Devyatov D.X., Panteleev I.I. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. 1999. №8. pp. 62–65.
7. Dyudkin D.A., Tokarev V.L., Il'in A.A., Onopchenko V.M., Kurapin B.S. Stal'. 1981. №9. S. 30–32.
8. Danilov V.L., Korablin A.I. Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. 1989. №12. pp. 142–145.
9. Yaukola M., Kivelya E., Konttinen Yu., Lajtinen E. Stal'. 1995. №2. pp. 25–29.
10. Okamura Kazuo. Tetsu To Hagane - Journal of The Iron and Steel Institute of Japan. 1987. №12. pp. 175.
11. Kabakov Z.K., Gabelaya D.I. Issledovanie usadki slitka v kristallizatore v processe nepreryvnoj razlivki stali. [Study of ingot shrinkage in a mold during continuous casting of steel]. Progressivny'e processy i oborudovanie metallurgicheskogo proizvodstva: Materialy II Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii (Materials II All-Russian Scientific and Technical Symposium "Advanced processes and equipment of metallurgical production"). Cherepovecz: ChGU. 2001. pp. 53–55.
12. Kabakov Z.K., Gabelaya D.I., Gribkova Yu.V., Egorenkova S.V. Vestnik Cherepoveczkogo gosudarstvennogo universiteta. Cherepovecz: ChGU. 2007. №3. pp. 83–84.