

УДК 621.746.5.047

Расчет напряжений в корочке стальной цилиндрической заготовки и усилие ее вытягивания из кристаллизатора.

Часть 1. Для кристаллизатора с медной стенкой

Стулов Вячеслав Викторович^(*)

stuvv@inbox.ru

Шафиев Олег Михайлович

oleg.shafiev2016@gmail.com

Беленикина Анастасия Федоровна

belenikina@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Приведены результаты расчета градиента температур по высоте корочки непрерывнолитой стальной заготовки диаметром 0,15 м при скорости разливки стали 4 м/мин в медный кристаллизатор, на основании которых определены напряжения в корочке и давление металла заготовки на стенку кристаллизатора. Качание кристаллизатора и наличие трения скольжения позволило установить усилие вытягивания стальной заготовки, равное 468 Н. Результаты расчета сравниваются с результатами экспериментальных исследований усилия вытягивания стальной заготовки из кристаллизатора при его качании. Разработанный и изготовленный механизм качания опытного кристаллизатора будет использован при выполнении опытных разливок металла.

Ключевые слова: медный цилиндрический кристаллизатор, градиент температур в стальной корочке, напряжения в корочке, трение скольжения, усилие вытягивания заготовки

Calculation of stresses in the crust of a steel cylindrical billet and the force of its extraction from the crystallizer.

Part 1. For a crystallizer with a copper wall

Stulov Vyacheslav Viktorovich

stuvv@inbox.ru

Shafiev Oleg Mikhailovich

oleg.shafiev2016@gmail.com

Belenikina Anastasia Fyodorovna

belenikina@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of calculating the temperature gradient along the crust height of a continuously cast steel billet with a diameter of 0.15 m at a steel pouring rate of 4 m/min into a copper crystallizer. Based on these results, the stresses in the crust and the pressure of the billet metal on the crystallizer wall are determined. The crystallizer rocking and the presence of sliding friction made it possible to establish the steel billet pulling force equal to 468 N. The calculation results are compared with the results of experimental studies of the steel billet pulling force from the crystallizer during its rocking. The developed and manufactured rocking mechanism for the experimental crystallizer will be used in performing experimental metal castings.

Keywords: copper cylindrical crystallizer, temperature gradient in steel crust, stresses in crust, sliding friction, billet pulling force

Расчет напряжений в корочке непрерывно литой стальной заготовки необходим, в частности при сравнении конструкций кристаллизаторов, изготавливаемых из разных материалов и системами их охлаждения, а также при расчете давления корочки заготовки на стенку кристаллизатора. На качество получаемых непрерывнолитых стальных заготовок и его повышение направлены усилия ученых и производителей продукции как в нашей стране, так и за рубежом, которое неразрывно связано с возникающими в затвердевающей корочке заготовки напряжениями. Напряжения в корочке заготовки зависят от конструктивного исполнения кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), системы его охлаждения, материала стенок и их покрытия, работы механизма качания кристаллизатора, состава шлакообразующей смеси (ШОС), способа подвода расплава. Разработка и изготовление механизма качания опытного кристаллизатора позволит корректировать результаты расчета усилия вытягивания заготовки.

В работах [1, 2] приведены результаты расчета в Ansys и по аналитически полученному выражению напряжений в корочке стальной заготовки диаметром 0,15 м в первую секунду разливки стали в кристаллизаторы различных конструкций и системами охлаждения. Показано, что замена материала стенок и ее температуры приводит к изменению до 15 %, возникающих в корочке напряжений в первую секунду разливки стали. Так, для стали Ст3 при скорости разливки 2,5 м/мин в первую секунду разливки перепад температур по толщине корочки достигает 39 °С, среднее значение температуры корочки 1439 °С, а среднее значение радиального напряжения 18,7 кПа. В то время, как при скорости разливки 1,5 м/мин максимальное значение радиального напряжения достигает 10 кПа.

В работе [3] установлена взаимосвязь основных физических величин, влияющих на напряжения и деформацию корочки заготовки. Выполнена оценка прочности стальной корочки при различных условиях ее формирования в кристаллизаторе. Из приведенной в работе зависимости деформации корочки от перепада температуры в ней следует, что с увеличением перепада температур в корочке деформация ее увеличивается. Недостатком работ [1–3] является отсутствие результатов расчета напряжений в корочке по высоте кристаллизаторов и усилий вытягивания заготовок.

В работе [4] отмечается, что способ непрерывной разливки стали получил широкое распространение за счет высокой скорости теплоотвода. Однако ускоренное охлаждение обуславливает появление и быстрое развитие в оболочке заготовки значительных температурных градиентов, под действием которых она сжимается и расширяется, что приводит к возникновению термических напряжений. Трение заготовки со стенками кристаллизатора также может вызвать образование трещин на поверхности металла. В работе [5] также отмечается, что при формировании оболочки заготовки в кристаллиза-

торе происходит ее деформация под действием термических напряжений и ферростатического давления металла. Деформация стенок в верхней части кристаллизатора оказывает влияние на образующуюся корочку заготовки.

В работе [6] Л.В. Булановым с соавторами приведены значения толщины стальной корочки по высоте слябового кристаллизатора с толщиной медной стенки 30 мм при скорости разливки расплава 4 м/мин. Показано, что в верхней части толщина корочки — 2,5 мм, в средней части — 7 мм и на выходе из кристаллизатора — 10 мм. При этом температура наружной поверхности корочки в верхней части кристаллизатора — 1400 °С, в средней части — 1250 °С и на выходе из кристаллизатора (на расстоянии 0,8 м от верха) — 1200 °С.

В работе [7] А.В. Куклевым с соавтором приведены результаты исследования усилий вытягивания стальной слябовой заготовки сечением 250×1550 мм при скорости разливки металла 0,8 м/мин. Показано, что в зависимости от параметров качания кристаллизатора и марки шлакообразующей смеси (ШОС) усилие вытягивания стальной заготовки достигает 6 кН и более.

В работе [8] М.П. Галкиным рассматривается получение непрерывнолитых слябовых заготовок из легированных и высоколегированных сталей (07Х25Н13, Х23Н18 и др.) на заводе «Серп и молот» сравнительно небольших поперечных сечений 140×300, 140×400 мм и др. В основу технологии разливки сталей [8] положен способ обработки сталей с низкой технологической пластичностью. В виду низкой технологической пластичности разливаемой стали предпочтение отдается регулированию охлаждения в кристаллизаторе.

Повышение качества непрерывной разливки стали и качества слябов диктует необходимость изучения трения в кристаллизаторе [9]. X. Zang с соавторами [9] отмечают, что при обычном синусоидальном законе качания кристаллизатора разливка с высокими скоростями может сопровождаться меньшим подводом шлакообразующей смеси в зону контакта сляба и кристаллизатора, повышением трения и ухудшением качества поверхности. При скорости разливки слябов 1,66 м/мин и частоте 158,4 цикл/мин, амплитуде качания ± 5 мм скорость кристаллизатора и сляба за цикл качания по несинусоидальному закону: максимальная скорость 0,0392 м/с, а минимальная — 0,0499 м/с; при синусоидальном качании скорость изменяется от — 0,0452 до 0,0467 м/с. Zang X. с соавторами было установлено, что работа, совершаемая сжимающей силой при несинусоидальном качании в 2 раза больше, а фактическая величина опережения кристаллизатора на 40 % выше, чем при синусоидальном качании. Отмеченные преимущества способствуют лучшему «залечиванию» поверхностных трещин и лучшему отделению оболочки слитка от кристаллизатора, уменьшают склонность к образованию и распространению трещин и, как результат, улучшение качества поверхности литой заготовки.

Цель работы — определение напряжений в корочке непрерывнолитой стальной цилиндрической заготовки, давлений на медные стенки кристаллизатора и усилия вытягивания заготовки. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач: распределение температур в корочке

металла с использованием программного комплекса Dassault Systems SolidWorks 2020; определение среднего значения толщины корочки в кристаллизаторе при заданной скорости разливки стали; разработка механизма качания опытного кристаллизатора.

Исходные данные: кристаллизатор, мм: диаметр получаемой заготовки $d_3 = 0,15$ м, высота $H = 1000$ мм, толщина медной стенки $\delta_c = 0,030$ м, щелевой зазор для прохода охлаждающей воды $\delta_3 = 0,005$ м. Параметры процесса: марка разливаемой стали — Сталь 20, температура расплава $T_0 = 1530$ °С, температура солидус $T_s = 1510$ °С, скорость разливки стали $v_p = 4$ м/мин, средняя плотность подводимого теплового потока $\bar{q} = 2$ МВт/м², зазор между корочкой заготовки и стенкой кристаллизатора (через слой ШОС) $\delta_{ш} = 0,0008$ м, скорость воды в щелевом зазоре кристаллизатора $\omega_b = 8$ м/мин. Параметры стали Сталь 20 [10]: плотность $\rho = 6800$ кг/м³, теплоемкость $C = 720$ Дж/(кг К), коэффициент теплопроводности $\lambda = 28$ Вт/(м² К), теплота кристаллизации стали $\gamma = 277$ кДж/кг. На рис. 1 приведена 3D-модель цилиндрического кристаллизатора.

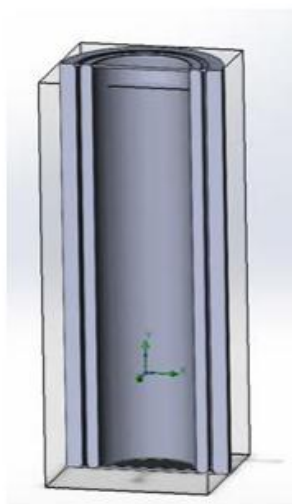


Рис. 1. 3D-модель кристаллизатора

Результаты расчета. На рис. 2 приведено температурное поле металла со средними значениями температур по высоте корочки заготовки, которые можно условно разбить на 5 зон, °С: 1 — 1512; 2 — 1491; 3 — 1467; 4 — 1433; 5 — 1391. На рис. 3 приведены средние значения температур в медной стенке по высоте кристаллизатора. Из рис. 3 следует, что в самой верхней части — $T_{c1} = 64$, а в нижней части кристаллизатора — $T_{c2} = 66$ °С. С учетом рисунка 2 средний перепад температур по толщине корочки по высоте заготовки (в середине каждой из 5 зон), °С: 1 — $\Delta t_{к1} = 18$; 2 — 39; 3 — 63, 4–97; 5 — 139 °С. Уточним перепад температур ΔT_c в медной стенке кристаллизатора при среднем значении $\bar{q} = 2$ МВт/м² при скорости разливки стали 4 м/мин по уравнению Фурье [10]:

$$q = \lambda \Delta T_c / \delta, \quad (1)$$

где $\lambda = 300 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ — коэффициент теплопроводности медной стенки; $\delta = 0,030$ — толщина стенки, м. После подстановки в (1) исходных данных получаем $\Delta T_c = 200 \text{ }^\circ\text{C}$. Тогда среднее значение температуры на поверхности медной стенки $T_{\text{сп}} = 264 \text{ }^\circ\text{C}$.

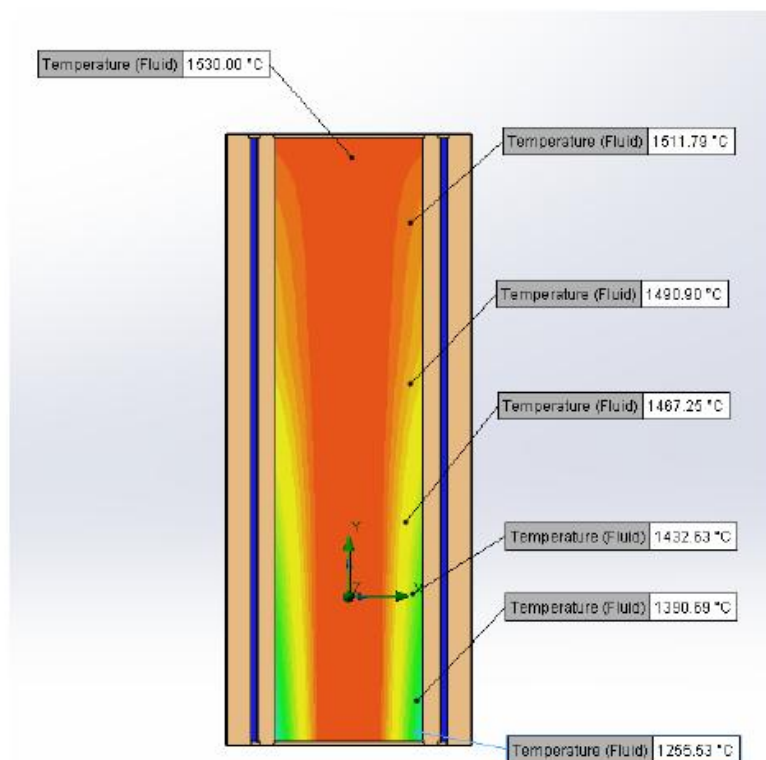


Рис. 2. Средняя температура стальной корочки по высоте кристаллизатора

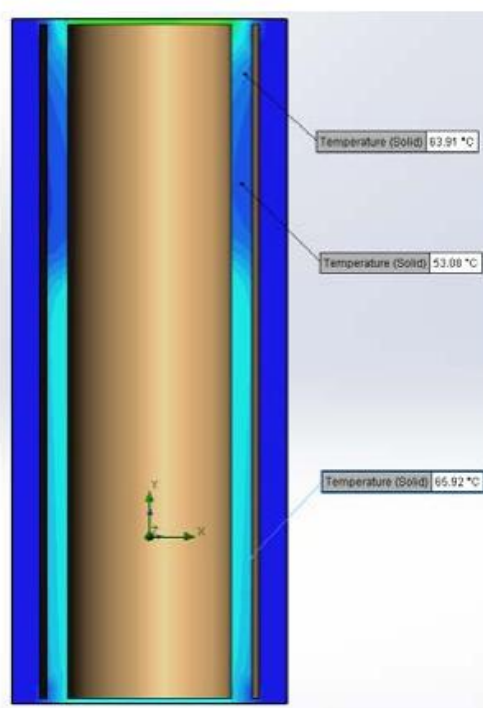


Рис. 3. Средние значения температур по высоте медной стенки кристаллизатора

Толщина корочки стальной заготовки в каждой из 5 зон определяется по выражению [4]:

$$\xi = k \tau^{0,5}, \quad (2)$$

где $k = [\lambda (T_{пл} - T_{сп})/\rho r]^{0,5}$ — коэффициент затвердевания стали; $\tau = H/v_p$ — время разливки стали; H — расстояние от мениска до середины каждой из пяти зон; $T_{пл}$ — температура плавления стали; $T_{сп} = 264^\circ\text{C}$ — температура на поверхности медной стенки. При времени для середины каждой из 5 зон ($\tau_1 = 3$, $\tau_2 = 6$, $\tau_3 = 9$, $\tau_4 = 12$, $\tau_5 = 15$ с) и после подстановки в выражение (2) исходных данных получаем для середины каждой из 5 зон значения ξ , 10^{-3} м: $\xi_1 = 7,5$; $\xi_2 = 10,6$; $\xi_3 = 12,9$; $\xi_4 = 15$; $\xi_5 = 16,7$. При установленных по толщине корочки Δt_k и ξ получаем значения $\Delta t_k / \xi$ в середине каждой из 5 зон, $^\circ\text{C}/\text{м}, 10^3$: $(\Delta t_k / \xi)_1 = 2,4$; $(\Delta t_k / \xi)_2 = 3,68$; $(\Delta t_k / \xi)_3 = 4,9$; $(\Delta t_k / \xi)_4 = 6,47$; $(\Delta t_k / \xi)_5 = 8,3$. Результаты расчета $(\Delta t_k / \xi)$ по высоте корочки стальной заготовки приведены на рис. 4. Из рис. 4 следует, что с увеличением расстояния от верха кристаллизатора значения $(\Delta t_k / \xi)$ увеличиваются.

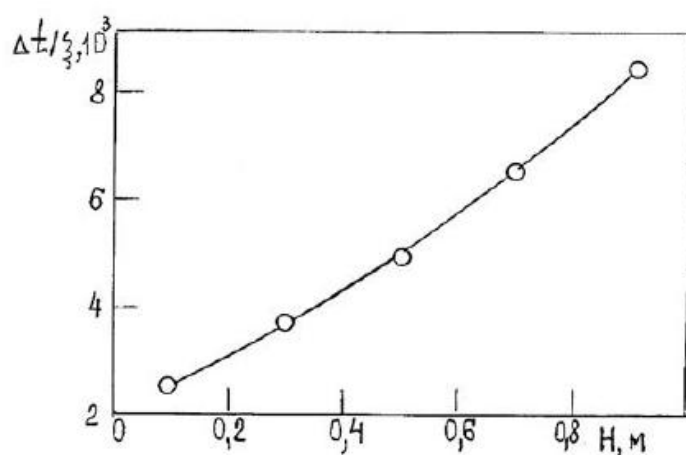


Рис. 4. Средние соотношения градиента температур к толщине корочки по высоте кристаллизатора

На основании установленных значений Δt_k и ξ определим возникающие по высоте корочки напряжения по выражению [2]

$$\sigma^{4/3} = A(\Delta t_k^{4/3} / \xi), \quad (3)$$

где $A = \lambda^{4/3} \text{Ko}^{-3,5} / [\gamma^{2/3} (\pi d)^{1/3}]$ — параметр; $\text{Ko} = C\Delta t_p / \gamma$ — число Коссовича. После подстановки в параметр A исходных данных при $\text{Ko} = 0,052$ получаем $A = 207,2$. Выражение (3) записывается

$$\sigma^{4/3} = 207,2 (\Delta t_k^{4/3} / \xi). \quad (4)$$

После подстановки в выражение (4) исходных данных Δt_k и ξ для 5 зон по высоте заготовки в кристаллизаторе получаем значения σ , $\text{Н}/\text{м}^2$: $\sigma_1 = 38905$; $\sigma_2 = 66069$; $\sigma_3 = 91201$; $\sigma_4 = 125893$; $\sigma_5 = 165959$. При этом среднее значение напряжений в корочке стальной заготовки $\bar{\sigma} = 97614 \text{ Н}/\text{м}^2$.

На рис. 5 показано распределение напряжений по высоте корочки заготовки в кристаллизаторе. Из рис. 5 следует, что с увеличением расстояния от верха кристаллизатора и толщины корочки напряжения в корочке увеличиваются.

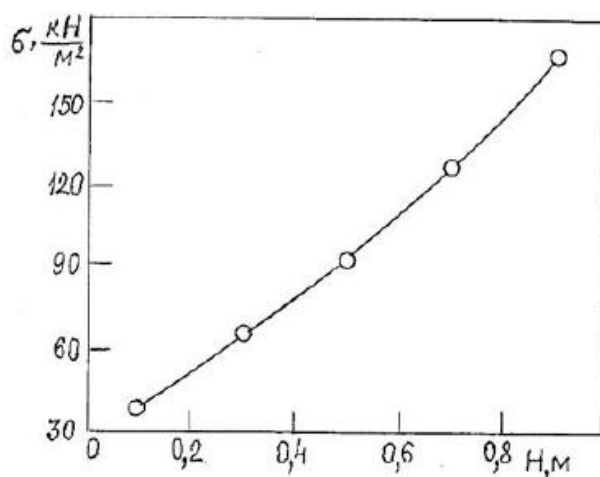


Рис. 5. Средние значения напряжений в стальной корочке заготовки по высоте от верха кристаллизатора

В случае полного контакта корочки цилиндрической заготовки со стенкой кристаллизатора на площади поверхности $S_{к1} = 0,47 \text{ м}^2$ среднее значение силы на стенку $G = 45878 \text{ Н}$. При качании кристаллизатора значение силы трения F_t заготовки с медной стенкой $F_t = Gk$, где k — коэффициент трения. В работе [11] приведены значения k для металла по металлу: $k_1 = 0,1$ (при сухом трении скольжения); $k_2 = 0,01$ (при трении скольжения со смазкой). Тогда значения сил трения/усилия вытягивания заготовки из кристаллизатора: $F_{т1} = 4587,8 \text{ Н}$ при сухом трении скольжении и $F_{т2} = 458,8 \text{ Н} = 45,9 \text{ кг}$ при трении скольжения со смазкой.

Обсуждение полученных результатов: сравнительный анализ усилия вытягивания стальной заготовки из кристаллизатора. В работе [7] А.В. Куклевым с соавтором приведены значения усилия вытягивания слябовой заготовки сечения $250 \times 1550 \text{ мм}$ при скорости разливки $v_p = 0,8 \text{ м/мин}$ и качании кристаллизатора равные: $F_{тс} = 6000 \text{ Н}$ с ШОС (К-1) и $F_{тс} = 3000 \text{ Н}$ с ШОС (ГШОС-6). При этом в случае полного контакта корочки заготовки со стенкой кристаллизатора площадь поверхности $S_{к2} = 3,6 \text{ м}^2$. При соотношении площадей контакта корочки заготовки со стенками в слябовом и цилиндрическом кристаллизаторах $S_{к2}/S_{к1} = 3,6/0,47 = 7,64$ раза сила трения/усилие вытягивания цилиндрической заготовки $d = 0,15 \text{ м}$ равняется $F_{тц} = 393\text{--}785 \text{ Н} = 39,3\text{--}78,5 \text{ кг}$. Среднее значение усилия вытягивания цилиндрической заготовки $F_{т11} = 58,9 \text{ кг}$. Сравнение усилий вытягивания цилиндрической заготовки $F_{т1} = 46,8 \text{ кг}$, полученного в результате расчета, и $F_{т11} = 58,9 \text{ кг}$, полученного в результате анализа, показывает, что расхождение не превышает 21 % и определяется погрешностями задания значений коэффициентов трения и площади контакта корочки заготовки со стенкой.

Разработка механизма качания кристаллизатора. Был спроектирован эксцентриковый кривошипно-шатунный механизм качания кристаллизатора. Для данного механизма была выбрана высокая частота качания — 300 об/мин при амплитуде, 5 мм, что соответствует имеющимся исследованиям оптимального режима качания [7]. При движении кристаллизатора давление корочки металла на его внутреннюю поверхность уменьшается при скорости его перемещения, превышающей скорость вытягивания заготовки. Механическое качание кристаллизатора с использованием эксцентрикового механизма обеспечивает синусоидальный закон движения кристаллизатора. Кинематическая схема механизма качания кристаллизатора на рис. 6 реализована следующим образом.

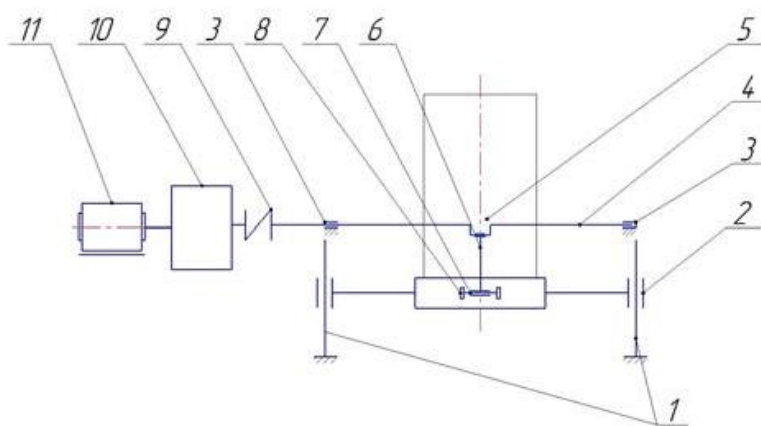


Рис. 6. Кинематическая схема кристаллизатора

По направляющим 1 на линейных подшипниках качается рама 2 с установленным в ней кристаллизатором 5. Через палец 7, закрепленный в опорах 8, рама подвижно соединена с шатуном 6, имеющим втулку-эксцентрик, жестко соединенную с валом 4, вращающимся в подшипниках 3 и приводимым в движение через муфту 9 с выходным валом редуктора 10. К преимуществам рассматриваемого механизма можно отнести следующее: относительно небольшая масса рамы качания; обеспечение возвратно-поступательного движения; равномерное распределение нагрузки на две направляющие; возможность варьировать амплитуду качания посредством применения различных втулок. В качестве недостатка — возможность возникновения люфтов и перекосов в траектории движения кристаллизатора.

Заключение. Выполненный расчет напряжений в корочке непрерывнолитой стальной цилиндрической заготовки диаметром 0,15 м в медном кристаллизаторе показывает, что при скорости разливки стали $v_p = 4$ м/мин среднее значение напряжения в корочке $\sigma = 97\,614$ Н/м², а усилие вытягивания заготовки при качании кристаллизатора $F_t = 458,8$ Н (при трении скольжения со смазкой). Сравнение усилий вытягивания стальной заготовки, полученных в результате расчета и анализа, показывает, что расхождение не превышает 21 %. Применение разработанного механизма качания при разливке заготовок в кристаллизатор на опытной установке обеспечит уменьшение усилия

вытягивания заготовки и улучшение качества поверхности металла, организацию непрерывного процесса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-29-00055, <https://rscf.ru/project/24-29-00055/>

Список источников

- [1] Стулов В.В., Колесников А.Г., Иванов А.В. Улучшение качества поверхности, структуры и выхода годных непрерывнолитых заготовок в кристаллизаторе новой конструкции и системой охлаждения. *Перспективы развития металлургических технологий, обеспечивающих повышение качества металлопродукции, посвященного 80-летию основания ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина. Междунар. металлур. форум: матер.* Москва, Металлургиздат, 2024, с. 89–95.
- [2] Стулов В.В. Анализ напряжений в корочке непрерывной стальной заготовки, получаемой в кристаллизаторах МНЛЗ. *Металлург*, 2025, № 1, с. 59–65.
- [3] Стулов В.В., Шафиев О.М. К вопросу деформации корочки стальной заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ. *Сталь*, 2021, № 6, с. 13–16.
- [4] Попандопуло И.К., Михневич Ю.Ф. *Непрерывная разливка стали*. Москва, Металлургия, 1990, 296 с.
- [5] Ганкин В.Б., Николаев Г.И., Смоляков А.С. и др. Работы ВНИИМетМаш в области создания кристаллизаторов для литья сортовых и круглых заготовок. *60 лет непрерывной разливки стали в России: сб. ст.* Москва, Интерконтакт Наука, 2007, с. 309–321.
- [6] Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П. *Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет*. Екатеринбург, Уральский центр ПР и рекламы, 2003, 320 с.
- [7] Куклев А.В., Лейтес А.В. *Практика непрерывной разливки стали*. Москва, Металлургиздат, 2011, 432 с.
- [8] Галкин М.П. Освоение непрерывной разливки высоколегированных марок стали на УНРС Московского металлургического завода «Серп и молот». *60 лет непрерывной разливки стали в России: сб. ст.* Москва, Интерконтакт Наука, 2007, с. 124–126.
- [9] Zang X., Wang X., Man Y et al. Investigation of Friction Force between Mould and Strand Shell under Sinusoidal and Non-sinusoidal Oscillation in Continuous Slab Casting. *Steel Research International*, 2008, vol. 79, no. 7, pp. 564–568.
- [10] Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцев Б.Т. *Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник*. Москва, Энергоатомиздат, 1982, 512 с.
- [11] Кухлинг Х. *Справочник по физике*. Москва, Мир, 1983, 520 с.