

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РАЗЛИВКИ ЗАГОТОВОК НА СТОЙКОСТЬ ГИЛЬЗ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СОРТОВЫХ МНЛЗ

А.Б.Бирюков, В.В.Кравцов, Е.С.Лоленко (ДонНТУ, г. Донецк)

В результате проведения ряда численных экспериментов показано, что существует некоторый оптимальный диапазон скорости разливки, при работе в котором возрастает стойкость кристаллизаторов. Для предварительного определения границ оптимального диапазона скорости разливки в каждом конкретном случае предложено руководствоваться анализом расчетной кривой, описывающей интенсивность силового взаимодействия в донной части кристаллизатора в зависимости от скорости разливки

Из практики разливки сортовых заготовок на высокопроизводительных сортах МНЛЗ известно, что стойкость внутренней поверхности гильз кристаллизаторов зависит от множества факторов. Среди них можно выделить следующие основные: скорость разливки, температура разливки, марка стали, профиль кристаллизатора.

В работе [1] была предложена методика для изучения усадки заготовок в зависимости от условий разливки и проектирования профилей кристаллизаторов, повторяющих кривые усадки заготовок из конкретных марок стали (групп марок стали). В данной работе этот подход используется для изучения влияния скорости разливки на износ кристаллизаторов.

Прежде всего, для решения поставленной задачи была проведена следующая серия численных экспериментов: исследовалось изменение средней температуры корочки непрерывнолитой заготовки формирующейся в кристаллизаторе для разных скоростей разливки (именно средняя температура корочки при прочих равных условиях определяет размер заготовки с точки зрения естественной усадки). Исходные данные: сечение заготовки 125x125 мм; активная длина кристаллизатора 0,9 м. Расчеты производились для следующих значений скорости разливки металла: 3,2 м/мин; 3,8 м/мин; 4,4 м/мин; 5 м/мин; 5,6 м/мин.

Результаты расчетов представлены на рисунке 1.

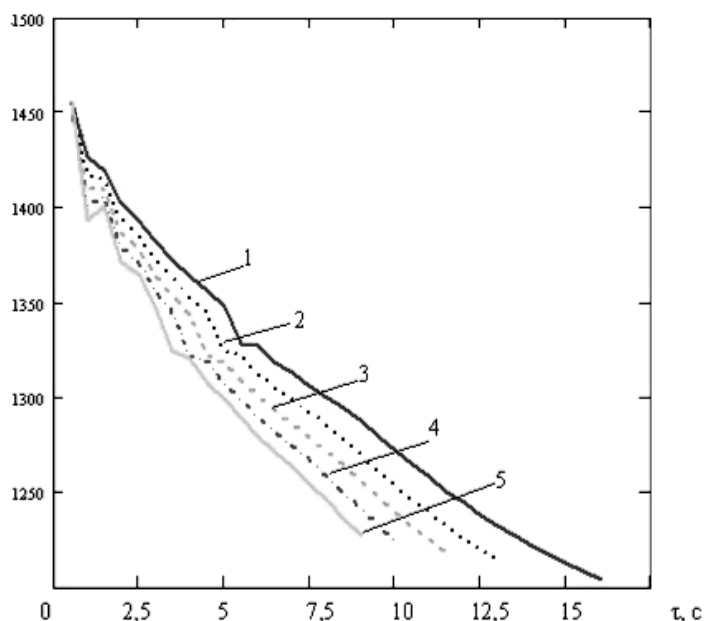


Рисунок 1 – Данніе об изменении средней температуры корочки непрерывнолитой заготовки, формирующейся в кристаллизаторе для разных скоростей разливки (1 – 3,2 м/мин; 2 – 3,8 м/мин; 3 – 4,4 м/мин; 4 – 5 м/мин; 5 – 5,6 м/мин)

Необходимо отметить, что для адекватного сопоставления расчетных данных по оси абсцисс отложено время, причем для каждой рассматриваемой скорости разливки изучаемая кривая начата в нулевой момент времени и закончена в момент выхода расчетного сечения из кристаллизатора. Из анализа представленной информации можно заключить, что на выходе из кристаллизатора средняя температура корочки для всех скоростей разливки примерно одинакова (можно отметить, лишь некоторое крайне незначительное повышение средней температуры корочки, порядка четырех градусов, при росте скорости на каждые 0,6 м/мин).

То есть, на основании результатов расчетов изменения средней температуры корочки заготовки, формирующейся в кристаллизаторе, можно сделать вывод, что естественная усадка заготовки мало зависит от скорости разливки и, следовательно, является, прежде всего, функцией химического состава каждой конкретной марки стали, который определяет значение коэффициента линейной усадки [1].

В случае если внутренний размер кристаллизатора меньше размера, который должна иметь заготовка с точки зрения естественной усадки (здесь учитываются марка стали и температурно-скоростной режим разливки) происходит износ стенок кристаллизатора, причем тем интенсивней, чем больше это несоответствие.

Большое влияние на стойкость внутренней поверхности кристалли-

затоворов оказывают механические свойства материала, из которого он изготовлен. Например, чистая медь марок М1, М2 и М3 имеет высокую теплопроводность, но при этом характеризуется высоким коэффициентом линейного расширения при нагревании и низкими механическими свойствами (твердостью и сопротивлением истиранию). На улучшение комплекса механических свойств материала кристаллизатора эффективно влияет легирование меди малым количеством серебра или хрома (эти элементы повышают температуру рекристаллизации меди). Также повышение стойкости достигается за счет нанесения на внутреннюю поверхность покрытия из хрома или молибдена.

Из практики разливки стали на радиальных сортовых машинах известно, что в случае излишней конусности износ кристаллизаторов развивается следующим образом: начинается примерно от середины кристаллизатора в области ребер, расширяется вдоль ребер книзу. В донной части кристаллизатора ввиду воздействия ферростатического давления износ начинает проявляться также в области центров граней и имеет треугольную форму, расширяющуюся книзу.

Для изучения силового взаимодействия корочки формирующейся заготовки с материалом гильзы кристаллизатора предложена и проанализирована соответствующая расчетная схема. В результате был сделан вывод о том, что при проведении расчетов влиянием растяжения граней гильзы кристаллизатора и изгибом граней заготовки под воздействием ферростатического давления на создание общей величины интенсивности силового взаимодействия в угловых элементах кристаллизатора можно пренебречь. В итоге предложены следующие зависимости для определения интенсивности силового взаимодействия (P , Н/м²) и контактных давлений (p , Па) в угловых элементах кристаллизатора:

$$P = \frac{\Delta l \cdot \delta}{l} \cdot E + P_{\phi} (l - 2\delta) \quad (1)$$

$$p = \frac{\Delta l}{l} \cdot E + \frac{P_{\phi} (l - 2\delta)}{\delta} \quad (2)$$

где Δl – разница между размером заготовки с точки зрения естественной усадки и размером кристаллизатора в каждом конкретном поперечном сечении кристаллизатора, м;

l – размер кристаллизатора в поперечном сечении, м;

E – модуль упругости, как функция химического состава изучаемой марки стали и средней температуры, характерной для корочки в каждом конкретном поперечном сечении, Па;

P_{ϕ} – ферростатическое давление столба жидкого металла, Па;

δ – средняя толщина корочки, м.

В качестве примера использования предложенной расчетной зависимости на рисунке 2 приводятся результаты расчета интенсивности силового взаимодействия в угловых элементах кристаллизатора, внутренний профиль которого соответствует профилям кристаллизаторов, используемых на практике, при разливке марок стали с содержанием углерода (0,06, 0,09, 0,17, 0,2, 0,38, 0,45 %) для скорости разливки 5 м/мин.

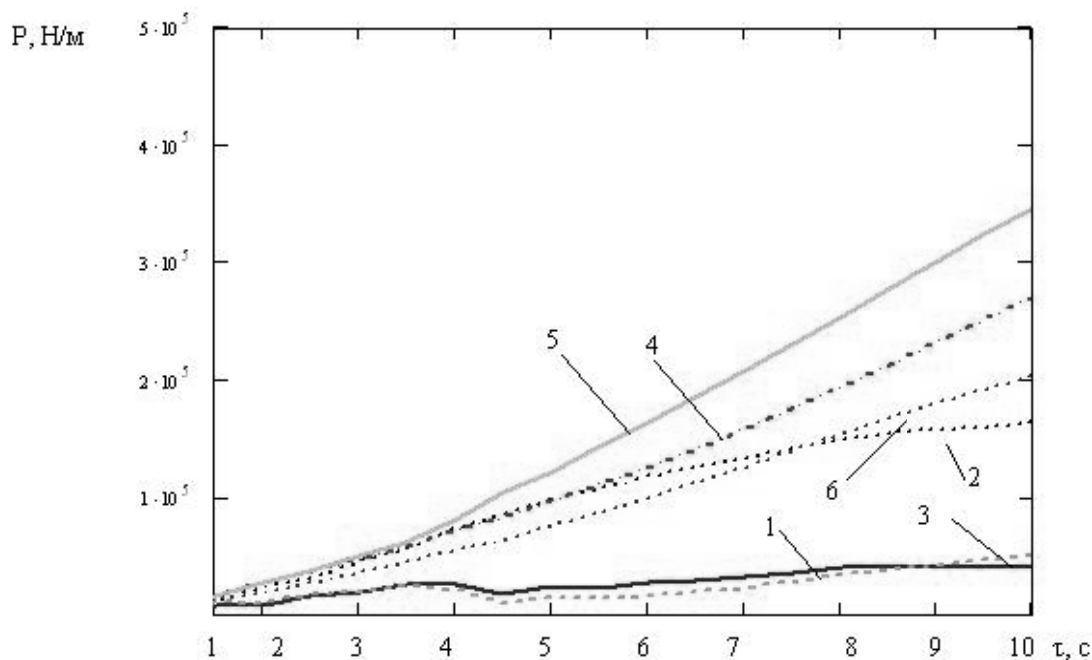


Рисунок 2 – Изменение интенсивности силового взаимодействия в угловых элементах кристаллизатора при разливке непрерывнолитых заготовок сечением 125x125 мм со скоростью разливки 5 м/мин (1 – для стали с $C=0,06\%$; 2 – $C=0,09\%$; 3 – $C=0,17\%$; 4 – $C=0,2\%$; 5 – $C=0,38\%$; 6 – $C=0,45\%$).

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что наибольшие значения интенсивности силового взаимодействия имеют место при разливке марок стали, которые имеют меньшее значение коэффициента линейной усадки [1], т.е. в меньшей мере усаживаются по мере движения вдоль кристаллизатора. Расчетные кривые носят возрастающий характер, то есть по мере продвижения заготовки вперед интенсивность силового взаимодействия в угловых элементах кристаллизатора возрастают. Это соотношение хорошо согласуется с имеющимся практическим материалом, о износе углов кристаллизаторов, который, начинаясь приблизительно в центре кристаллизатора, непрерывно усиливается, достигая максимума в районе его донной части.

Необходимо отметить, что вклад растяжения граней от ферростатического давления играет малую роль в создании общей величины интенсивности силового взаимодействия (2 – 5 %) для марок стали, чья усадка в

значительной мере не соответствует внутреннему профилю кристаллизатора. Для марок стали, чьи кривые усадки в высокой степени согласуются с внутренним профилем кристаллизатора, величина интенсивности силового взаимодействия практически полностью определяется ферростатическим давлением. То есть основной причиной износа кристаллизаторов в районе ребер является несоответствие естественного размера заготовки внутреннему размеру кристаллизатора.

Таким образом, выбирая максимально возможное значение коэффициента трения, характерного для материала кристаллизатора, можно от интенсивности силового взаимодействия перейти к расчету истирающих усилий и оценить износ кристаллизатора в каждом конкретном случае в зависимости от внутреннего профиля кристаллизатора, температурно-скоростного режима разлива, химического состава разливаемых марок стали.

Совместный анализ результатов расчетов средней температуры корочки заготовки в зависимости от скорости разлива (рисунок 1) и зависимости для расчета интенсивности силового взаимодействия (1) позволяет заключить, что с повышением скорости разлива величина интенсивности силового взаимодействия в угловых элементах кристаллизатора должна снижаться. Таковую закономерность можно пояснить тем, что как было показано ранее, усадка заготовки в кристаллизаторе практически не зависит от скорости разлива (то есть, на каждом горизонте кристаллизатора величина несоответствия внутреннего размера кристаллизатора и заготовки для каждой марки является практически постоянной величиной), в то же время при прочих равных условиях повышение скорости приводит к тому, что для аналогичных горизонтов кристаллизатора корочка затвердевшего металла становится более тонкой, и, следовательно, для ее сжатия до нужного размера требуется меньшее продольное усилие, что позволяет уменьшить интенсивность силового взаимодействия в угловых элементах кристаллизатора.

Для иллюстрации вышесказанного был проведен анализ зависимости величины интенсивности силового взаимодействия в угловых элементах донной части кристаллизатора (взяв тот же профиль кристаллизатора, что и при проведении расчетов для построения рисунка 2) от скорости разлива. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.

Анализ полученных результатов, позволяет заключить, что для всех рассматриваемых марок стали повышение скорости разлива позволяет снизить величину интенсивности силового взаимодействия.

В наибольшей мере эта закономерность проявляется для марок стали с меньшим значением коэффициентов линейной усадки ($C=0,38\%$ и $C=0,2\%$) и в наименьшей мере для сталей с большими значениями коэф-

коэффициентов усадки ($C=0,06\%$ и $C=0,17\%$), чья усадка хорошо соответствует внутреннему профилю рассматриваемого кристаллизатора.

Интенсивность износа внутренней поверхности кристаллизатора, несомненно, пропорциональна мощности трения в угловых элементах кристаллизатора, которая в свою очередь пропорциональна произведению трех множителей: величины интенсивности силового взаимодействия, коэффициента трения и скорости разливки.

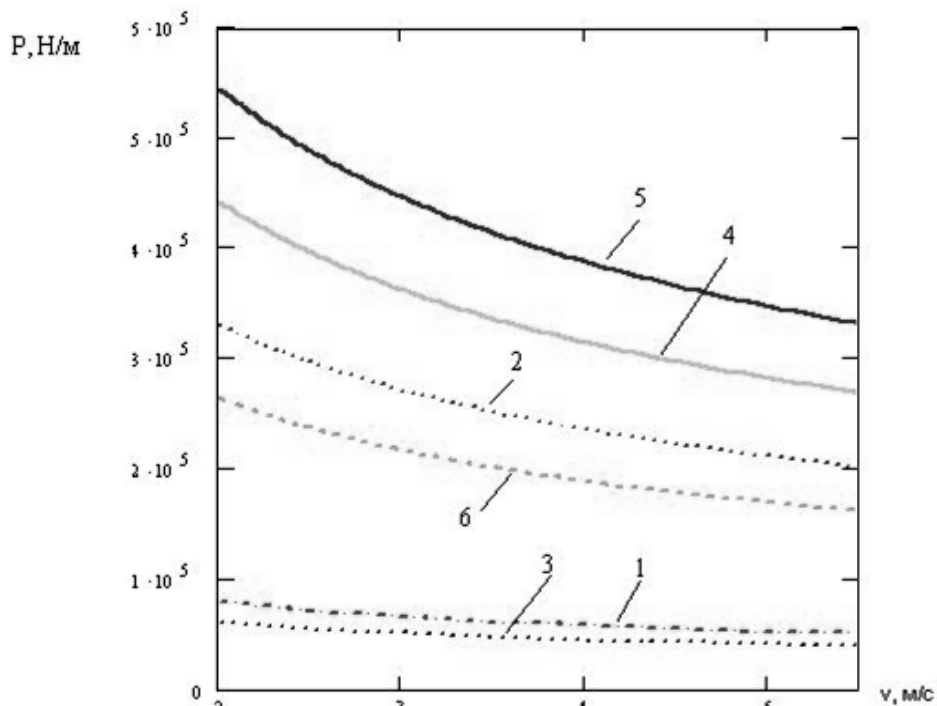


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности силового взаимодействия в угловых элементах кристаллизатора в его донной части в зависимости от скорости разливки (1 – для стали с $C=0,06\%$; 2 – $C=0,09\%$; 3 – $C=0,17\%$; 4 – $C=0,2\%$; 5 – $C=0,38\%$; 6 – $C=0,45\%$)

Общий качественный характер зависимости коэффициента трения от скорости взаимного перемещения трущихся поверхностей таков: его величина сначала уменьшается с ростом скорости, затем стабилизируется и начинает возрастать. Применительно к взаимодействию корочки заготовки с материалом гильзы кристаллизатора на сегодня накоплен ряд опытных данных о количественном значении среднего по поверхности кристаллизатора коэффициента трения для некоторых частных случаев [2, 3]. Однако сегодня нет возможности сделать достоверные количественные оценки локальных значений коэффициента трения в угловых элементах кристаллизатора на его разных горизонтах.

Однако несомненно, что кривая, описывающая зависимость мощности трения от скорости разливки имеет экстремальный характер (рисунок

4). Это равносильно утверждению о том, что существует оптимальный диапазон скоростей разливки, при работе в котором значение мощности трения и, следовательно, степень износа внутренней поверхности кристаллизаторов минимальны. Из вышесказанного следует вывод о том, что в каждом конкретном случае неоправданно низкие или высокие скорости разливки будут приводить к повышенному износу внутренней поверхности кристаллизаторов и образованию ромбичности заготовок, что подтверждается практическими данными.

Естественно, что эта закономерность в большей мере проявляется при разливке сталей с высокой степенью несоответствия усадки внутреннему профилю кристаллизатора (так как в этом случае величина интенсивности силового взаимодействия намного более значительна). А для сталей, чья усадка соответствует профилю кристаллизатора, удовлетворительные показатели стойкости кристаллизаторов могут быть получены в достаточно широком диапазоне скоростей разливки.

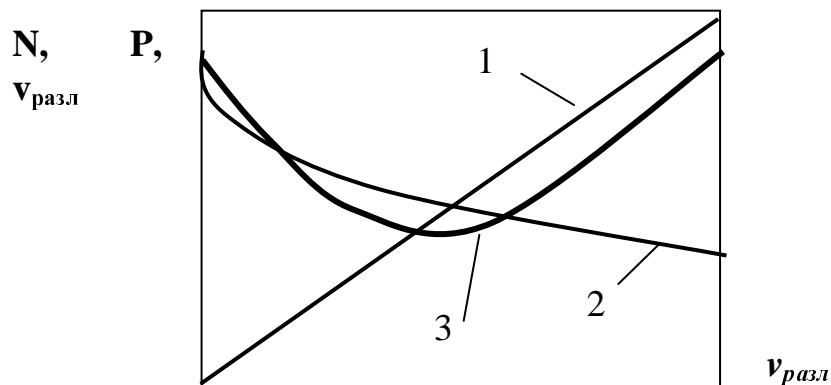


Рисунок 4 – Схематичное пояснение экстремального характера кривой зависимости мощности трения от скорости разливки (1 – скорость разливки $v_{разл}$; 2 – контактные усилия P ; 3 – мощность трения N)

Отсюда, в каждом конкретном случае (конкретный профиль кристаллизатора и набор марок стали) для определения оптимального диапазона скоростей необходимо строить и анализировать кривые зависимости интенсивности силового взаимодействия от скорости разливки (например, рисунок 3). Повышение скорости разливки должно приводить к снижению мощности в том диапазоне скоростей разливки, где темп снижения величины контактных усилий значителен. Для более высоких значений скорости разливки рост скорости опережает снижение интенсивности силового взаимодействия, и мощность трения начинает возрастать. Выполнение количественных оценок зависимости мощности трения от скорости разливки затруднительно из-за отсутствия данных о зависимости локальных значений коэффициента трения от скорости разливки.

Литература

1. Амитан В.Н., Кравцов В.В., Бирюков А.Б. Изучение усадки непрерывнолитой сортовой заготовки с целью повышения стойкости кристаллизаторов // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2004. – № 7. – С. 188-191.
2. Бровман М.Я. О силах трения между слитком и кристаллизатором при непрерывной разливке стали // *Металлы.* – 2003. – № 6. – С. 21 – 29.
3. Трение между заготовкой и кристаллизатором при разливке стали на МНЛЗ / Э. Ферстер, Х.В.Гуденау, Г.М. Кемпер, К. Штеркен // *Черные металлы.* – 2000. – № 9. – С. 34-41.

**© А.Б.Бирюков, В.В.Кравцов,
Е.С.Лоленко 2007**