

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ШПИЛЕЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ СБОРНЫХ ПЛИТ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ

И.М. Ячиков¹, В.И. Панферов¹, Н.А. Феоктистов², В.П. Чернов²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Наиболее ответственным узлом при разливке стали в машине непрерывного литья заготовок является кристаллизатор. Наибольшее распространение получают удобные в эксплуатации и изготовлении составные кристаллизаторы, состоящие из медной рабочей стенки со щелевыми каналами и стального внешнего корпуса. В промышленных конструкциях составных кристаллизаторов соединение медной и стальной плит осуществляется посредством множества стальных шпилек, причем они расположены по поверхности плиты крайне неравномерно из-за наличия каналов охлаждения, шпонок и уплотнителя. Целью работы является создание математической модели для определения коэффициента неравномерности нагружения шпилек и запаса прочности соединения медной и стальной плит для заданной конструкции сборного кристаллизатора и выбранных типовых параметров шпилечного соединения. Учет возникающих неодинаковых нагрузок на шпильки осуществлялся путем расчета коэффициента неравномерности. Полагали, что максимальная растягивающая сила, приходящаяся на одну шпильку, пропорциональна этому коэффициенту и средней растягивающей силе. Для каждой шпильки выделялся кластер, включающий в себя заданное число ближайших к ней шпилек. Определялось среднее расстояние в кластере, среднее значение расстояния по всем кластерам и относительное расстояние для кластера, связанного с определенной шпилькой. Нагрузка на резьбовое соединение пропорциональна площади соединяемых плит, которые удерживает шпилька, поэтому полагали, что коэффициент неравномерности нагрузки для заданной шпильки пропорционален квадрату относительного расстояния. Показан пример расчета коэффициента неравномерности нагрузки для рассматриваемой конструкции промышленного сборного кристаллизатора. Приведена математическая модель для определения запаса прочности шпилечного соединения медной и стальной плит кристаллизатора, а также необходимого момента затяжки шпильки, обеспечивающего нераскрытие стыка. Расчеты учитывали максимальное испытательное давление воды и максимальное внешнее усилие сдвига при трении слитка о стенку кристаллизатора. Создана компьютерная программа, позволяющая анализировать надежность соединения стальной и медной стенки кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок при моделировании разных ситуаций, в том числе форс-мажорных и аварийных.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, медная плита кристаллизатора, стальной кожух, запас прочности, шпилечное соединение, момент затяжки гайки, щелевые каналы.

Введение

При разливке стали в МНЛЗ наиболее ответственным узлом, определяющим ее технико-экономические показатели, является кристаллизатор. Наиболее распространенными являются конструкции кристаллизаторов со сверленными цилиндрическими или фрезерованными щелевыми каналами в медной стенке [1, 2].

Из-за необходимости сверлить длинные отверстия кристаллизаторы первой конструкции сложны в своем изготовлении, кроме то-

го, довольно трудоемка технология очистки каналов от накипи, проводимая во время ремонта стенок кристаллизатора [3].

В настоящее время перспективными являются более простые в эксплуатации и изготовлении составные кристаллизаторы, состоящие из медной рабочей стенки со щелевыми каналами и стального внешнего корпуса. В них охлаждающая вода подается снизу, проходит через прямоугольные вертикальные каналы, далее собирается в коллекторе сверху и отводится из кристаллизатора.

При всех явных преимуществах перехода от цилиндрических каналов к щелевым возникают и проблемы, в частности, связанные с простым и надежным закреплением медной и стальной плит. При номинальном давлении воды в каналах $P_{в} = 6$ бар на медные плиты действует существенная сила давления, кроме того, на медную стенку действуют переменные сдвиговые силы, связанные с протяжкой слитка, и динамические усилия от механизма качания.

Во всех известных промышленных конструкциях составных кристаллизаторов соединение медной и стальной плит осуществляется посредством множества стальных шпилек, причем они расположены по поверхности плиты крайне неравномерно. Возможные места их расположения ограничены наличием каналов охлаждения, шпонок и уплотнителя. Таким образом, при закреплении плит посредством резьбовых соединений возникает задача расчета прочности шпилечного соединения при всей совокупности действия максимальных сил и существующей неравномерности нагружения шпилек.

Постановка задачи

На металлургических предприятиях в России и за рубежом происходит переход от кристаллизаторов МНЛЗ со сверленными каналами к сборным кристаллизаторам. На рис. 1 показан схематический чертеж широкой медной стенки кристаллизатора слябовой МНЛЗ, приведено расположение щелевых каналов и соединительных шпилек. Основные геометрические характеристики медной стенки приведены в табл. 1.

Для соединения медной плиты и стального кожуха используется шпилечное соединение, показанное на рис. 2. Оно включает в себя шпильку, втулку с наружной резьбой $M30 \times 1,5$, шайбу и гайку. Основные геометрические параметры резьбового соединения показаны в табл. 2. В качестве крепежного соединения стальной и медной плит используются шпильки $M20 \times 100$ ГОСТ 9066–75 (58 – класс прочности, материал шпильки – сталь 20).

Целью работы является создание математической модели для определения коэффициента неравномерности нагружения шпилек и

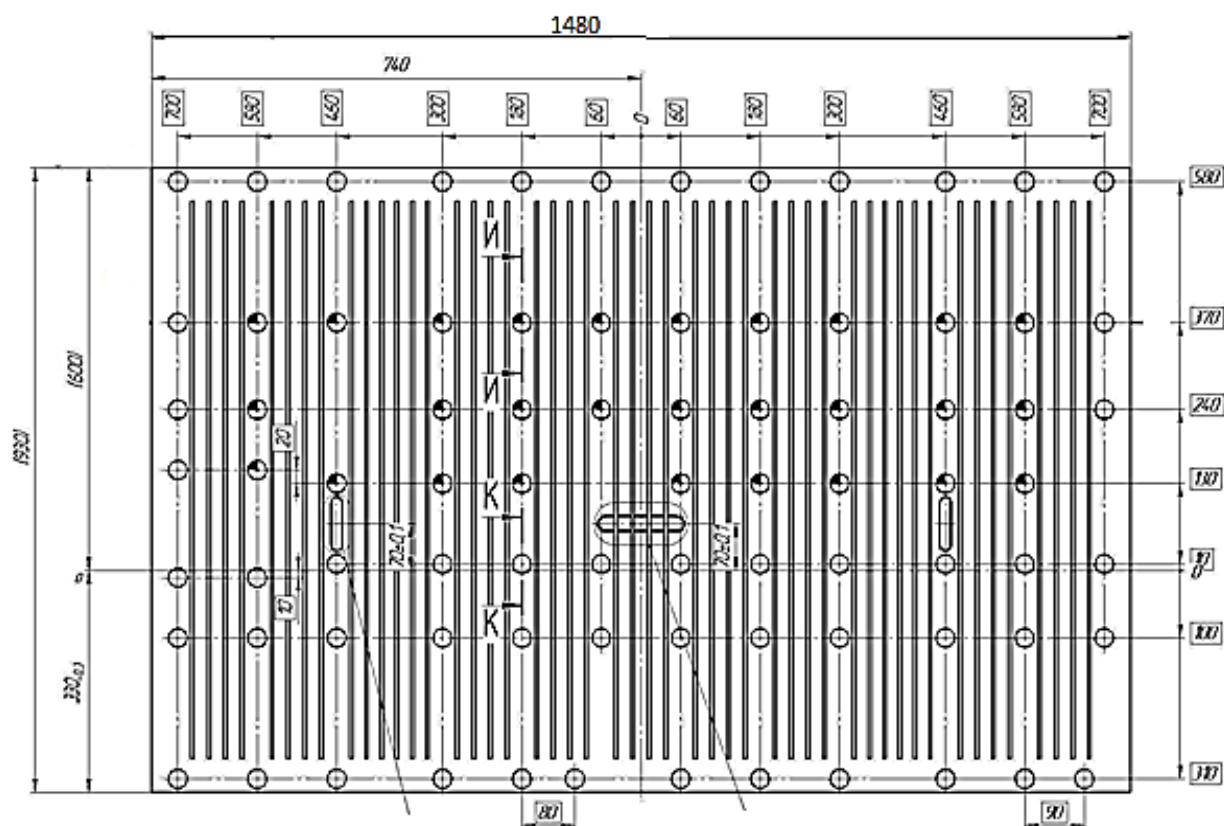


Рис. 1. Расположение щелевых каналов, соединительных шпилек в широкой медной стенке кристаллизатора

Таблица 1

Геометрические характеристики медной стенки кристаллизатора
со щелевыми каналами

Название параметра	Обозначение	Единица измерения	Численное значение
Длина стенки кристаллизатора	L	мм	1480
Длина малой стенки кристаллизатора	L_M	мм	250
Высота стенки кристаллизатора	B	мм	930
Число соединительных шпилек	$n_{шп}$		81
Ширина вертикальных каналов	$h_{вк}$	мм	5
Число вертикальных каналов	$n_{вк}$		48
Длина вертикальных каналов	$L_{вк}$	мм	830
Ширина горизонтальных водяных каналов	$h_{гк}$	мм	60
Число горизонтальных каналов	$n_{гк}$		2
Длина горизонтальных каналов	$L_{гк}$	мм	1380
Число шпонок 16 × 10 × 80	$n_{шп1}$		2
Число шпонок 22 × 14 × 130	$n_{шп2}$		1

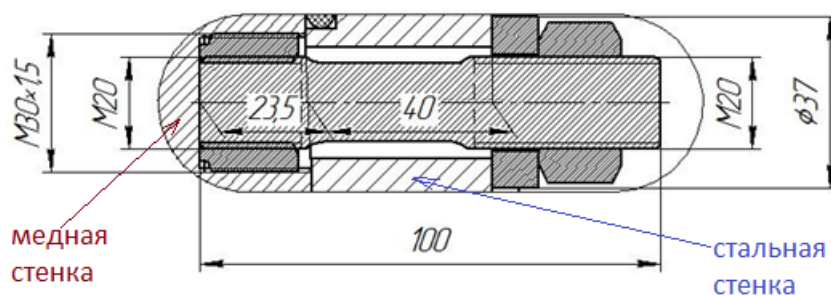


Рис. 2. Основные геометрические размеры шпилечного соединения
медной плиты и стального кожуха кристаллизатора

Таблица 2

Параметры используемого резьбового шпилечного соединения

Название параметра	Обозначение	Единица измерения	Численное значение
Диаметр шпилек	d	мм	20
Средний диаметр резьбы	d_2	мм	18,376
Внутренний диаметр резьбы	d_1	мм	16,933
Шаг резьбы	P	мм	2,5
Число заходов резьбы	$n_{ш}$		1
Наружный диаметр опорной поверхности гайки	$D_{ш0}$	мм	37
Диаметр втулки М30 × 1,5 в медном корпусе	$d_{ш0}$	мм	30
Угол профиля, равный углу между смежными сторонами	α	град	60
Угол подъема винтовой линии	$\gamma = \arctg\left(\frac{Pn_{ш}}{\pi d_2}\right)$	град	2,48
Длина резьбы со стороны втулки	$l_{рез}$	мм	23,5

запаса прочности соединения медной и стальной плит для заданной конструкции сборного кристаллизатора МНЛЗ и выбранных параметров шпилечного соединения.

Определение коэффициента неравномерности нагружения шпилек

Из размеров, приведенных на чертеже (см. рис. 1), определяем площади:

медной плиты

$$S_{\Pi} = L \cdot B \approx 1,376 \text{ м}^2;$$

смоченной поверхности водой со стороны стальной плиты

$$S_{\text{в}} = n_{\text{вк}} h_{\text{вк}} L_{\text{вк}} + n_{\text{тк}} h_{\text{тк}} L_{\text{тк}} \approx 0,365 \text{ м}^2.$$

Вычисляем площадь, занимаемую шпонками:

$$\Delta S = n_{\text{шп1}} (16 \cdot 80) + n_{\text{шп2}} (22 \cdot 130) \approx 0,005 \text{ м}^2,$$

и площадь, занимаемую отверстиями под шпильки:

$$S_{\text{ш}} = n_{\text{шп}} \cdot d_{\text{ш0}}^2 \cdot \pi / 4 \approx 0,057 \text{ м}^2.$$

Исходя из полученных значений, можно получить площадь соприкосновения медной и стальной поверхностей

$$S_{\text{ст}} = S_{\Pi} - S_{\text{в}} - \Delta S - S_{\text{ш}} \approx 0,949 \text{ м}^2$$

и определить силу нормального давления со стороны воды на стальную плиту как

$$F_{\text{н}} = S_{\text{ст}} \cdot P_{\text{в}} \approx 22,3 \text{ тс}.$$

Для установления величины коэффициента неравномерности нагружения шпилек была выбрана система декартовых координат. Ее начало находится на пересечении вертикальной линии, проходящей через середину медной плиты $L/2$ и горизонтальной линии – на расстоянии 330 мм от нижнего ее края (рис. 3). Из рис. 1 и 3 видно, что для рассматриваемой конструкции медной стенки шпиль-

ки по поверхности плиты расположены неравномерно. Учет возникающих неодинаковых нагрузок на шпильки осуществлялся с помощью расчета коэффициента неравномерности K_0 . Считали, что максимальная растягивающая сила, приходящаяся на одну шпильку, пропорциональна этому коэффициенту и средней растягивающей силе:

$$F_1 = K_0 \cdot \bar{F}, \quad (1)$$

где $\bar{F} = F_{\text{н}} / n_{\text{шп}} \approx 2702 \text{ Н} \approx 0,28 \text{ тс}$.

Задаем положение шпилек, расположенных на плите (x_i, y_i) относительно выбранной системы координат (см. рис. 3). Расстояние от i до j шпильки можно определить как евклидовую норму:

$$r_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (2)$$

Полученная матрица r симметрична относительно нулевой главной диагонали: $r_{i,j} = r_{j,i}$, $r_{i,i} = 0$.

Для i шпильки можно выделить кластер, включающий в себя k ближайших к ней шпилек. Для этого проводится сортировка $r_{i,j}$, в результате чего для i шпильки получим вектор расстояний k ближайших ее соседей $S_{i,k} = (S_{i,1}, S_{i,2}, \dots, S_{i,k})$. Можно определить среднее расстояние в кластере для i шпильки

$\bar{S}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k S_{ij}$, среднее значение расстояния по

всем кластерам $\bar{S} = \frac{1}{n_{\text{шп}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{шп}}} \bar{S}_i \approx 188 \text{ мм}$ и далее относительное расстояние для кластера, связанного с i шпилькой как $\varepsilon_i = \bar{S}_i / \bar{S}$.

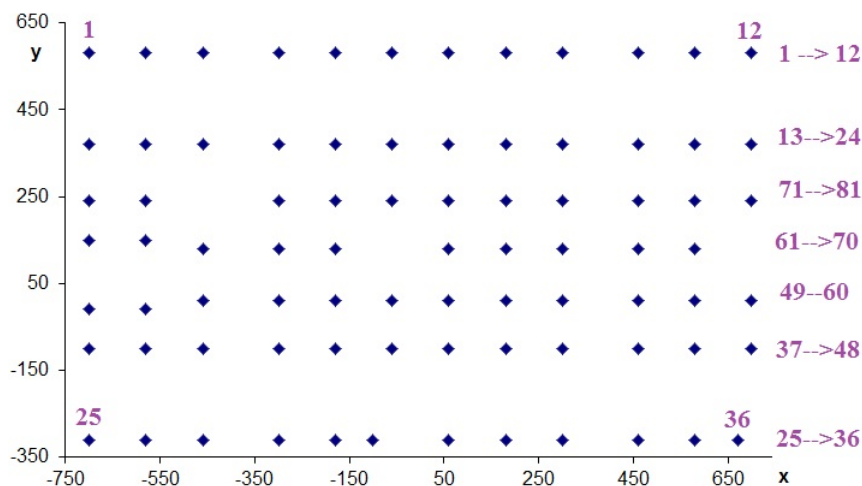


Рис. 3. Расположение шпилек и их нумерация по медной стенке кристаллизатора

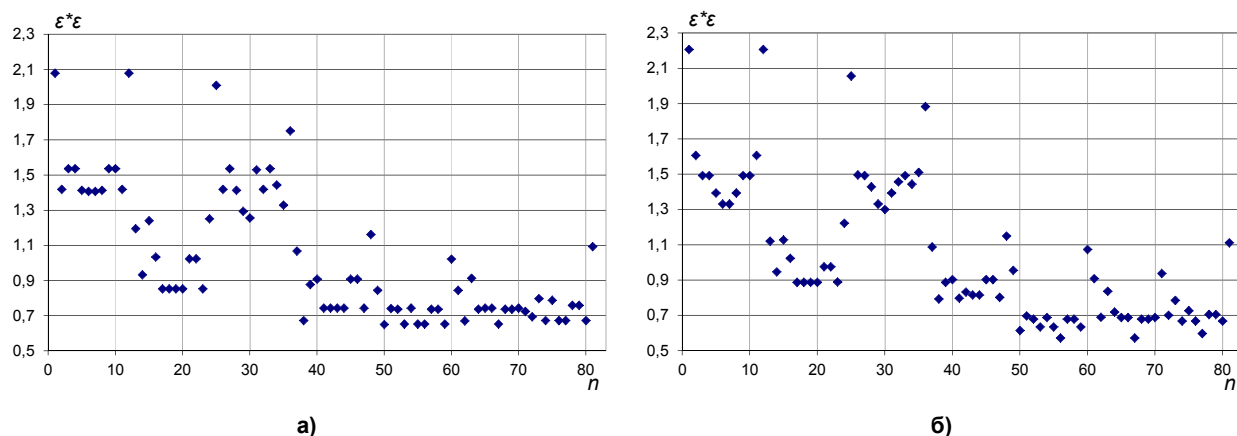


Рис. 4. Расчетный коэффициент неравномерности расположения шпилек от их номера, показанного на рис. 3, при разном количестве шпилек, входящих в кластер: а – $k = 5$; б – $k = 8$

Нагрузка на резьбовое соединение пропорциональна площади соединяемых плит, которые удерживает шпилька, поэтому будем полагать, что коэффициент неравномерности нагрузок для i шпильки пропорционален квадрату относительного расстояния для кластера:

$$K_{0i} \sim \varepsilon_i^2. \quad (3)$$

Значения ε_i^2 для всех шпилек ($n_{\text{шп}} = 81$) при $k = 5$ и $k = 8$ показаны на рис. 4. Видно, что максимальное значение имеют четыре точки. По номерам этих точек (1, 12, 25 и 36) можно установить, что они лежат вблизи углов прямоугольной плиты. Из-за особенностей данного расположения на самом деле нагрузка на эти шпильки существенно меньше. Несколько точек, например 3, 4, 9, 10, имеют значение ε_i^2 чуть больше 1,5, но они также располагаются вблизи края пластины. Примерно 25 % шпилек имеют $1 < \varepsilon_i^2 \leq 1,5$, исходя из этого для рассматриваемой конструкции расположения шпилек коэффициент их нерав-

номерности по нагрузке с запасом можно считать равным $K_0 \approx 1,5$.

Математическая модель для определения прочности шпилечного соединения медной и стальной плит кристаллизатора

Основные механические характеристики материалов и технологические параметры сведены в табл. 3.

Предварительная затяжка болта при сборке должна обеспечить плотность соединения и отсутствие раскрытия стыка после приложения силы давления воды $F_H = S_B \cdot P_B$ во время работы кристаллизатора.

В работе [6] принимается, что при установке шпилек в отверстие с зазором внешняя растягивающая сила полностью передается болту. От этой силы болт удлиняется на Δl_0 . На это же значение уменьшается сжатие деталей, и нагрузка на болт со стороны плиты понижается. Допустимый зазор между стянутыми стенками не более 0,15 мм.

Таблица 3

Механические характеристики материалов и технологические параметры работы кристаллизатора

Название параметра	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Номинальное давление в водяной системе	P_B	6	ати
Максимальное испытательное давление в водяной системе	$P_{B \text{ max}}$	12	ати
Максимально допустимая сила отрыва слитка [4]	$F_{s \text{ max}}$	20	тс
Коэффициент трения сталь-сталь [5]	f	0,15	
Коэффициент трения сталь-медь [5]	f_M	0,2	

Внешнее усилие F_H перераспределяется между стыком и винтом, причем одна часть внешней нагрузки дополнительно нагружает винт, а другая идет на уменьшение затяжки стыка [7]. Весь стык ослабляется на величину $\Delta F = (1 - \chi) \cdot F_H$, а каждая i шпилька – $\Delta F_i = (1 - \chi) \cdot F_i$, где χ – коэффициент основной нагрузки, равный 0,25.

Кроме нормальной силы F_H на плиту действует усилие сдвига F_S , направленное вертикально вдоль поверхности кристаллизатора. Усилие сдвига можно определить, зная максимально допустимую силу отрыва слитка от кристаллизатора:

$$F_S = \frac{F_{S \max} \cdot L}{2 \cdot (L + L_M)} \quad (4)$$

Первоначальная сила затяжки шпильки с учетом сдвигающей силы при $\chi = 0,25$

$$F_0 = \frac{F'_0}{n_{\text{шп}}} + (1 - \chi) \cdot F_i, \quad (5)$$

где $F'_0 = F_S \cdot S_s / f_M$ – условие несдвигаемости медной и стальной плит за счет сил трения, при этом коэффициент запаса по сдвигу принимался $S_s = 1,2$. При расчете полагали, что $F_i = F_1$.

Сила затяжки при испытательном давлении воды $P = P_{\text{вmax}}$

$$F_{0\text{исп}} = \frac{S_B \cdot P_{\text{вmax}} (1 - \chi)}{n_{\text{шп}}} \quad (6)$$

Давление, стягивающее плиты во время работы кристаллизатора, $p_0 = F'_0 / S_{\text{ст}}$.

Момент затяжки T_3 связан с усилием затяжки F_0 следующими зависимостями [6]:

$$T_3 = l_3 \cdot \max(F_0, F_{0\text{шп}}), \quad (7)$$

где $l_3 = \left[\frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\gamma + \rho') + \frac{f}{3} \cdot \frac{D_{\text{ш0}}^3 - d_{\text{ш0}}^3}{D_{\text{ш0}}^2 - d_{\text{ш0}}^2} \right]$ – коэффициент пропорциональности момента затяжки от усилия затяжки; $\rho' = \operatorname{arctg} \frac{f_M}{\cos(\alpha/2)}$ –

приведенный угол трения. Величина эквивалентного напряжения, возникающего в стержне, равна

$$\sigma_e = \kappa_3 \cdot \frac{4 \cdot \max(F_0, F_{\text{исп}})}{\pi \cdot d_1^2}, \quad (8)$$

где коэффициент пропорциональности

$$\kappa_3 = \sqrt{1 + 12 \frac{d_2^2 (\operatorname{tg}^2(\gamma + \rho'))}{d_1^2}}.$$

В работе [7] указывается, что если гайка изготовлена из менее прочного материала, чем болт, то, несмотря на большую площадь среза ее витков, они могут оказаться менее прочными, чем витки резьбы болта. В этом случае в выражении (8) вместо внутреннего диаметра резьбы d_1 подставляется диаметр втулки $d_{\text{ш0}}$, а в условии прочности берутся свойства менее прочного материала, в данном случае меди:

$$\sigma_e = k_3 \frac{4 \max(F_0, F_{0\text{исп}})}{\pi d_{\text{ш0}}^2}. \quad (9)$$

Условие прочности болтового соединения: $\sigma_e \leq \frac{\sigma_r}{s}$, откуда коэффициент запаса прочности

$$s = \frac{\sigma_r}{\sigma_e}. \quad (10)$$

Желательно, чтобы длина резьбы в медьсодержащей стенке составляла $H = 1,5 \cdot d = 30$ мм. В рассматриваемом случае она равняется 22,5 мм.

Результаты моделирования запаса прочности соединения медной и стальной стенки

Пределы прочности и текучести для применяемых медных сплавов для изготовления кристаллизаторов, которые используются при изготовлении сборных стенок, приведены в табл. 4 [8].

Зная предел прочности σ_B , можно для медьсодержащих сплавов найти напряжение

Таблица 4

Предел прочности σ_B для некоторых медных сплавов, Н/мм²

Температура, °С	М2	М	МС	МЦ	НМС
20	230	220	440	230	750
100	225	–	–	–	–
200	211	–	–	–	–
300	198	150	310	–	650

среза $\tau_{cp} \approx 0,1 \cdot \sigma_b = (0,2 - 0,3) \cdot \sigma_r$ и предел текучести $\sigma_r = \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\right) \sigma_b$ [9]. Данные о пределах прочности $\sigma_{bc} = 500$ МПа и текучести $\sigma_{rc} = 400$ МПа для стали (сталь 20) были взяты из справочника [10].

По разработанной математической модели составлена компьютерная программа расчета «Рациональное расположение шпилек». Она позволяет по известным геометрическим и технологическим параметрам определить коэффициент неравномерности нагружения K_0 , среднее напряжение, которое действует в каждой шпильке при их конкретном расположении по поверхности плиты, момент затяжки

шпилек и запас прочности на срез резьбы в медной стенке.

Проведен механический расчет шпилек, которые предполагается использовать для крепления медных плит кристаллизатора, характеристики которых приведены в табл. 2. Коэффициент неравномерности, исходя из приведенного анализа, задавался как $K_0 = 1,5$. Результаты компьютерного расчета при этом значении показаны в табл. 5.

Для выбранного значения предела прочности медной стенки $\sigma_b = 220$ МПа (соответственно $\sigma_r = 100$ МПа и $\tau_{cp} = 25$ МПа) получены: запас прочности для соединения медь-штулка $s = 5,29$, для стальной шпильки – $s = 6,74$, значение момента затяжки $T_3 = 46,9$ Н·м.

Таблица 5
Результаты компьютерного расчета шпилечного соединения медной и стальной плиты

Название параметра	Обозначение	Численное значение	Единица измерения	Численное значение	Единица измерения
Сила нормального давления со стороны воды на стальную плиту	F_n	218 880	Н	22,3	тс
Средняя растягивающая сила на одну шпильку с учетом K_0	F_1	4053	Н	0,41	тс
Усилие сдвига плиты	F_s	83 838	Н	8,55	тс
Условие несдвигаемости плиты	F'_0	503 029	Н	51,3	тс
Средняя сила затяжки шпильки	F_0	9250	Н	0,94	тс
Сила затяжки, связанная с испытанием при повышенном давлении воды P_{max}	$F_{0\text{ исп}}$	4053	Н	0,41	тс
Средний коэффициент соотношения площадей каналов и шпилек	$K_{i\text{ ср}}$	6,4		–	–
Давление, стягивающее плиты при работе кристаллизатора	p_0	530 104	Па	5,3	ати
Приведенный угол трения	ρ'	0,227	рад	13,0	град
Коэффициент пропорциональности момента затяжки от усилия затяжки	l_3	0,0051	м	5,1	мм
Момент затяжки	T_3	46,9	Н м	–	–
Коэффициент для эквивалентного напряжения	k_3	1,44		–	–
Величина эквивалентного напряжения в шпильке	σ_e	59	МПа	59	Н/мм ²
Величина эквивалентного напряжения во штулке	σ_e	19	МПа	19	Н/мм ²
Запас прочности срыва шпильки по стали	$s_{ст}$	6,74		–	–
Запас прочности срыва шпильки по меди	s_m	5,29		–	–

Результаты моделирования прочности шпилечного соединения при использовании шпилек с отверстием под термодатчик

Для контроля температуры при работе кристаллизатора в него устанавливаются термодатчики. На рис. 5 показан чертеж шпильки с отверстием под термодатчик.

Оценим, насколько технологическое отверстие снижает прочность шпилечного соединения. Максимальное отверстие внутри шпильки имеет диаметр $d_{\text{отв}} = 7$ мм. Определим эквивалентный диаметр шпильки $d_{\text{эKB}} = \sqrt{d^2 - d_{\text{отв}}^2} = 18,7$ мм. Полученное значение несущественно отличается от диаметра

шпильки d и не влияет на разрыв материала шпильки по сравнению с прочностью резьбы, то есть при этих условиях резьба остается лимитирующим фактором.

Созданная компьютерная программа позволяет анализировать надежность соединения при моделировании разных ситуаций, в том числе форс-мажорных и аварийных. Например, можно промоделировать уменьшение количество шпилек на 25 %, вместо $n_{\text{шп}} = 81$ зададим $n_{\text{шп}} = 61$. Полученные результаты расчета сведены в табл. 6.

Видно, что запас прочности уменьшился, он составляет по меди $s \approx 4$, а момент затяжки шпилек увеличился: $T_3 = 62,2$ Н·м. Согласно общепринятым нормам в резьбовых соедине-

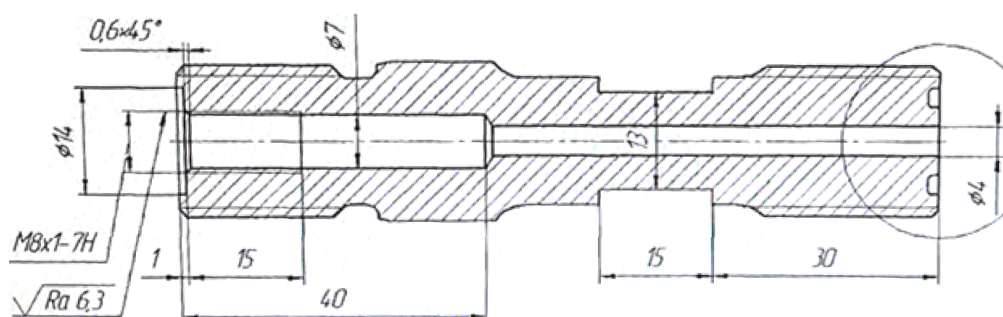


Рис. 5. Основные геометрические размеры шпильки с отверстием под термодатчик

Таблица 6

Результаты компьютерного расчета шпилечного соединения медной и стальной плиты

Название параметра	Обозначение	Численное значение	Единица измерения	Численное значение	Единица измерения
Сила нормального давления со стороны воды на стальную плиту	F_n	218 880	Н	22,3	тс
Средняя растягивающая сила на одну шпильку с учетом K_0	F_1	5382	Н	0,55	тс
Усилие сдвига плиты	F_s	83 838	Н	8,55	тс
Условие несдвигаемости плиты	F'_0	503 029	Н	51,3	тс
Средняя сила затяжки шпильки	F_0	12 283	Н	1,25	тс
Сила затяжки, связанная с испытанием при повышенном давлении воды P_{max}	$F_{0 \text{ исп}}$	5382	Н	0,55	тс
Средний коэффициент соотношения площадей каналов и шпилек	$K_{i \text{ ср}}$	8,5		–	–
Давление, стягивающее плиты при работе кристаллизатора	p_0	522 323	Па	5,2	ати
Приведенный угол трения	ρ'	0,227	рад	13,0	град
Коэффициент пропорциональности момента затяжки от усилия затяжки	l_3	0,0051	м	5,1	мм

Окончание табл. 6

Название параметра	Обозначение	Численное значение	Единица измерения	Численное значение	Единица измерения
Момент затяжки	T_3	62,2	Н м	–	–
Коэффициент для эквивалентного напряжения	k_3	1,44		–	–
Величина эквивалентного напряжения в шпильке	σ_e	79	МПа	79	Н/мм ²
Величина эквивалентного напряжения во втулке	σ_e	25	МПа	25	Н/мм ²
Запас прочности срыва шпильки по стали	$s_{ст}$	5,08		–	–
Запас прочности срыва шпильки по меди	s_m	3,99		–	–

ниях для подобных конструкций при контроле затяжки шпилек запас прочности должен быть не менее $s = 1,3-1,5$, а при отсутствии контроля – $s = 1,5-2,5$ [6].

Полученные результаты говорят о том, что даже если по всей площади плиты будут отсутствовать (или нарушится затяжка) у 25 % шпилек, то соединение остается вполне надежным.

Выводы

1. При заданном расположении шпилек по поверхности соединения медной и стальной плит предложена методика расчета коэффициента неравномерности нагружения шпилек. Показан пример расчета для предлагаемой конструкции широкой стенки промышленного сборного кристаллизатора.

2. Показана математическая модель для расчета запаса прочности срыва шпильки. Для предлагаемой конструкции кристаллизатора получен запас прочности для соединения медь-втулка $s = 5,29$. Определен необходимый момент затяжки шпильки, обеспечивающий нераскрытие стыка, который составил около 47 Н·м. Запас прочности срыва шпильки и момент ее затяжки получены при максимальном испытательном давлении воды 12 атм и с учетом максимального внешнего усилия сдвига при трении слитка о стенку кристаллизатора, равного 20 тс.

3. Создана компьютерная программа, позволяющая анализировать надежность соединения сборных стенок кристаллизатора при моделировании разных ситуаций, в том числе форс-мажорных и аварийных.

Литература

1. Вдовин, К.Н. *Непрерывная разливка стали: моногр.* / К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, И.М. Ячиков. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2012. – 540 с.
2. Вдовин, К.Н. *Непрерывная разливка сталей: моногр.* / К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, И.М. Ячиков. – СПб.: Лань, 2020. – 732 с.
3. *Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / под общ. ред. Г.А. Шалаева.* – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2003. – 320 с.
4. *Эффективность работы стенок кристаллизатора с цилиндрическими и целевыми каналами / В.И. Кадошиков, И.М. Ячиков, В.И. Завьялов, А.А. Подосян // Металлург.* – 2007. – № 6. – С. 40–42.
5. *Нисковских, В.М. Машины непрерывного литья слябовых заготовок / В.М. Нисковских, С.Е. Карлинский, А.Д. Баранов.* – М.: Металлургия, 1991. – 272 с.
6. *Куклин, Н.Г. Детали машин / Н.Г. Куклин, Г.С. Куклина.* – М.: Высшая школа, 1987. – 383 с.
7. *Шелофаст, В.В. Основы проектирования машин / В.В. Шелофаст.* – М.: Изд-во АПМ, 2005. – 472 с.
8. *Управление качеством непрерывнолитых заготовок: моногр.* / Д.Х. Девятков, О.С. Логунова, В.Д. Тутарова и др. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 367 с.

9. Детали машин / А.Т. Батулин, Г.М. Ицкович, Б.Б. Панич и др. – М.: Машиностроение, 1968. – 467 с.

10. Сорокин, В.Г. Стали и сплавы. Марочник / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

Ячиков Игорь Михайлович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; iachikovim@susu.ru, ORCID ORG: 0000-0002-1562-7506.

Панферов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; panferovvi@susu.ru.

Феоктистов Николай Александрович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; fna87@mail.ru.

Чернов Виктор Петрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; tchernov42@mail.ru.

Поступила в редакцию 4 апреля 2021 г.

DOI: 10.14529/met210209

MATHEMATICAL MODELING OF THE STRENGTH OF THE STUD CONNECTION OF ASSEMBLY PLATES OF THE CRYSTALLIZER OF CCM

I.M. Yachikov¹, iachikovim@susu.ru, ORCID ORG: 0000-0002-1562-7506,

V.I. Panferov¹, panferovvi@susu.ru,

N.A. Feoktistov², fna87@mail.ru,

V.P. Chernov², tchernov42@mail.ru

¹ *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,*

² *Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation*

The most critical unit when casting steel in a continuous casting machine is the mold. The most widespread are composite molds, convenient in operation and manufacture, consisting of a copper working wall with slotted channels and a steel outer casing. In industrial designs of composite molds, the connection of copper and steel plates is carried out by means of many steel pins, and they are extremely unevenly located along the surface of the plate due to the presence of cooling channels, dowels and a seal. The aim of the work is to create a mathematical model to determine the coefficient of uneven loading of the studs and the safety factor of the connection of copper and steel plates for a given design of the prefabricated mold and the selected typical parameters of the stud connection. The unequal loads on the studs were taken into account by calculating the coefficient of unevenness. It was believed that the maximum tensile force per stud is proportional to this coefficient and the average tensile force. For each hairpin, a cluster was identified, including a given number of hairpins closest to it. The average distance in the cluster, the average value of the distance across all clusters, and the relative distance for the cluster associated with a particular hairpin were determined. The load on the threaded connection is proportional to the area of the connected plates, which are held by the stud, therefore, it was assumed that the coefficient of unevenness of the load for a given stud is proportional to the square of the relative distance. An example of calculating the load non-uniformity coefficient for the considered design of an industrial prefabricated crystallizer is

shown. A mathematical model is presented to determine the safety margin of the stud connection of the copper and steel plates of the mold, as well as the required tightening torque of the stud, which ensures the joint will not open. The calculations took into account the maximum test pressure of water and the maximum external shear force during friction of the ingot against the wall of the mold. A computer program has been created that makes it possible to analyze the reliability of the connection between the steel and copper walls of the mold of the continuous casting machine when simulating various situations, including force majeure and emergency situations.

Keywords: continuous casting machine, mold copper plate, steel casing, safety factor, stud connection, nut tightening torque, slotted channels.

References

1. Vdovin K.N., Tochilkin V.V., Yachikov I.M. *Nepreryvnaya razlivka stali: monogr.* [Continuous casting of steel]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2012. 540 p.
2. Vdovin K.N., Tochilkin V.V., Yachikov I.M. *Nepreryvnaya razlivka staley: monogr.* [Continuous casting of steel]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2020. 732 p.
3. Shalaev G.A. (Ed.). *Mashiny nepreryvnogo lit'ya zagotovok. Teoriya i raschet.* [Continuous casting machines. Theory and calculation]. Ekaterinburg, Ural Center of PR and Advertising, 2003. 320 p.
4. Kadoshnikov V.I., Yachikov I.M., Zav'yalov V.I., Podosyan A.A. [Efficiency of the walls of the mold with cylindrical and slotted channels]. *Metallurg* [Metallurgist], 2007, no. 6, pp. 40–42. (in Russ.)
5. Niskovskikh V.M., Karlinskiy S.E., Baranov A.D. *Mashiny nepreryvnogo lit'ya slyabovykh zagotovok* [Continuous slab casting machines]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 272 p.
6. Kuklin N.G., Kuklina G.S. *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 383 p.
7. Shelofast V.V. *Osnovy proyektirovaniya mashin* [Fundamentals of Machine Design]. Moscow, APM Publ., 2005. 472 p.
8. Devyatov D.Kh., Logunova O.S., Tutarova V.D. et al. *Upravleniye kachestvom nepreryvnolitykh zagotovok: monogr.* [Quality management of continuously cast billets]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2006. 367 p.
9. Baturin A.T., Itskovich G.M., Panich B.B. et al. *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1968. 467 p.
10. Sorokin V.G., Gervas'yev M.A. *Stali i splavy. Marochnik.* [Steels and alloys. Vintage]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2001. 608 p.

Received 4 April 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Математическое моделирование прочности шпилечного соединения сборных плит кристаллизатора МНЛЗ / И.М. Ячиков, В.И. Панферов, Н.А. Феоктистов, В.П. Чернов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 87–97. DOI: 10.14529/met210209

FOR CITATION

Yachikov I.M., Panferov V.I., Feoktistov N.A., Chernov V.P. Mathematical Modeling of the Strength of the Stud Connection of Assembly Plates of the Crystallizer of CCM. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 87–97. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210209