

DOI: 10.17516/1999-494X-0421

УДК 66.971

Analysis of the Dynamics of Heat Exchange at Different Power of the Unit Continuous Combined Casting and Pressing Aluminum Alloy

Alexander P. Skuratov*,
Alexander V. Ivlev, Alexander S. Potapenko,
Yuri V. Gorokhov and Artem A. Pinykh*
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 22.06.2022, received in revised form 12.07.2022, accepted 19.08.2022

Abstract. A numerical study of the process of continuous combined casting and pressing of experimental aluminum alloy AK12 at various capacities of the continuous combined casting and pressing semi-industrial unit was carried out. A quantitative assessment of the influence of the heating rate of the crystallizer on the temperature and time characteristics during the transition thermal process is given. The heat engineering zones characterized by different intensity of heat exchange between the melt and the walls of the crystallizer are determined. It is shown that increasing the semi-industrial unit performance reduces the duration of the transient thermal process when starting from a cold state until it reaches a stationary thermal mode. The dependence of the time when the unit reaches a stationary thermal mode on the rotation speed of the horizontal crystallizer is obtained.

Keywords: semi-industrial unit, continuous combined casting and pressing, horizontal crystallizer, computer model, heat transfer, transition process, aluminum alloy, performance.

Citation: Skuratov, A.P., Ivlev, A.V., Potapenko, A.S., Gorokhov, Y.V., Pinykh, A. A. Analysis of the dynamics of heat exchange at different power of the unit continuous combined casting and pressing aluminum alloy. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(5), 610–621. DOI: 10.17516/1999-494X-0421

Анализ динамики теплообмена при различной производительности установки непрерывного совмещенного литья и прессования алюминиевого сплава

А. П. Скуратов, А. В. Ивлев,
А. С. Потапенко, Ю. В. Горохов, А. А. Пьяных
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Приведены результаты численного исследования непрерывного совмещенного литья и прессования опытного алюминиевого сплава АК12 при различной производительности установки с горизонтальным карусельным кристаллизатором. Дана количественная оценка влияния темпа разогрева кристаллизатора на температурно-временные характеристики в период переходного теплового процесса. Определены теплотехнические зоны, характеризующиеся различной интенсивностью теплообмена между расплавом и стенками кристаллизатора. Показано, что увеличение производительности установки сокращает продолжительность переходного теплового процесса при пуске установки из холодного состояния до достижения ею стационарного теплового режима. Получена зависимость времени выхода установки на стационарный тепловой режим от скорости вращения колеса-кристаллизатора.

Ключевые слова: установка, непрерывное совмещенное литье-прессование, горизонтальный кристаллизатор, компьютерная модель, теплообмен, переходный процесс, алюминиевый сплав, производительность.

Цитирование: Скуратов, А. П. Анализ динамики теплообмена при различной производительности установки непрерывного совмещенного литья и прессования алюминиевого сплава / А. П. Скуратов, А. В. Ивлев, А. С. Потапенко, Ю. В. Горохов, А. А. Пьяных // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(5). С. 610–621. DOI: 10.17516/1999-494X-0421

Введение

Развитие технологий литейного производства и обработки металлов давлением направлено в сторону объединения нескольких технологических переделов в одном [1–8].

В отечественной промышленности к таким инновационным установкам можно отнести горизонтальную машину полунепрерывного литья заготовок (ГМПЛЗ) [9]. Следует также отметить усовершенствованный процесс Экстролдинг, реализованный в опытно-промышленной установке СЛИПП-2,5, который представляет собой способ совмещения процессов прокатки и прессования в одном очаге деформации. В данной технологии выдавливание металла осуществляют через прессовую матрицу за счет активных сил контактного трения между валками и заготовкой [10].

За рубежом широкое распространение, особенно в цветной металлургии, получили агрегаты Super Caster итальянского производства фирмы Fata-Hunter, отличительной особенностью которых являются большие диаметры валков-кристаллизаторов, каждый из которых имеет индивидуальный привод от электродвигателя постоянного тока через планетарный редуктор [11, 12]. Используемая технология бесслитковой прокатки наименее капиталоемкая и влечет за собой незначительные эксплуатационные расходы. Однако литье металла на установке с дву-

мя валками-кристаллизаторами имеет ряд недостатков, обусловленных неотлаженной схемой подвода и удержания металла при минимальных обжатиях [13].

Прессование сплавов цветных металлов является сложным и энергоемким процессом. При прессовании выделяется большое количество теплоты, образованное действием сил трения и пластической деформации металла [14]. При увеличении скорости прессования интенсивно растет температура деформируемого металла, и при достижении критических температур происходит разрушение пресс-изделия [14, 15].

Одной из перспективных технологий для производства сварочной алюминиевой проволоки является установка непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов с горизонтальным карусельным кристаллизатором [15]. В ходе работы установки жидкий металл заливается через дозатор в кольцевую канавку вращающегося колеса-кристаллизатора и затвердевает до входа в неподвижную камеру прессования, образованную на участке сопряжения канавки с дугообразным сегментом. Затвердевший металл, поступая в камеру прессования, выдавливается в отверстие матрицы в виде пресс-изделия. Процессы заливки жидкого металла в канавку, его затвердевание и прессование протекают непрерывно [16].

Совмещение процессов непрерывного литья и прессования металла в единую технологическую цепочку возможно при таких тепловых условиях в системе «металл-кристаллизатор-окружающая среда», которые обеспечивают затвердевание расплава в канавке колеса-кристаллизатора и стабилизацию температуры в сечении расплава перед зоной прессования [17–20].

Исследования тепловой работы установки при проектном значении массового расхода расплава (производительности установки) показали, что в наиболее нестабильном переходном режиме, соответствующем промежутку времени от ее пуска из холодного состояния до достижения стационарного теплового состояния, происходит постепенный прогрев колеса-кристаллизатора с каждым его оборотом и изменение энтальпии расплава. При этом установлено, что основное влияние на процессы нестационарного теплообмена оказывает степень разогрева кристаллизатора. В результате были предложены режимные и конструктивные мероприятия, обеспечивающие при проектном значении производительности (скорости вращения кристаллизатора) рациональные температурно-временные условия работы установки во всем периоде ее эксплуатации [14].

Цель настоящей работы заключалась в изучении влияния производительности установки с горизонтальным кристаллизатором на характеристики переходного теплового процесса при непрерывном совмещенном литье-прессовании алюминиевого сплава.

Методика исследования

Анализ динамики теплообмена в переходном режиме работы установки проведен в трех расчетных сечениях, проходящих через объем затвердевающего в канавке металла и материала кристаллизатора. Сечения образованы вертикальной секущей плоскостью, расположенной на удалении от точки заливки расплава P под углами $\varphi_1 = 30^\circ$, $\varphi_2 = 120^\circ$ и $\varphi_3 = 210^\circ$ (рис. 1). Как видно, центральные углы φ_i дуги окружности канавки кристаллизатора радиусом $R_k = 0,35$ м расположены между полярной осью OP (отрезок $OP = R_k$) и лучами, соединяющими полюс O с расчетными сечениями. Отсчет φ_i принят в направлении по часовой стрелке.

В соответствии с технологическими условиями в контрольном сечении φ_3 , расположенном на угловом расстоянии $\Delta\varphi = 15^\circ$ от начала зоны прессования (неподвижного дугообразного

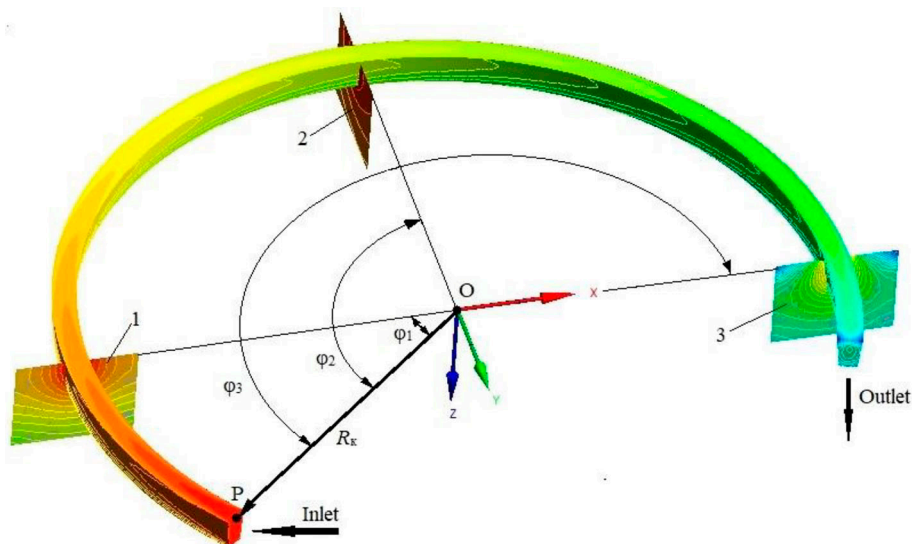


Рис. 1. Схема расположения расчетных сечений в теле горизонтального кристаллизатора от места заливки расплава P : 1, 2 и 3 – расчетные сечения, под центральными углами $\varphi_1 = 30^\circ$, $\varphi_2 = 120^\circ$ и $\varphi_3 = 210^\circ$

Fig. 1. The layout of the design sections in the body of the horizontal mold from the place of pouring the melt P : 1, 2 and 3 – design sections, at the central angles $\varphi_1 = 30^\circ$, $\varphi_2 = 120^\circ$ and $\varphi_3 = 210^\circ$

сегмента), должен быть обеспечен оптимальный диапазон температуры по сечению металла, максимальное значение которой на 3–5 °С ниже температуры затвердевания алюминиевого расплава [21].

Численные исследования проведены на разработанной ранее трехмерной компьютерной модели теплообмена в опытно-промышленной установке, реализованной на базе программных комплексов SolidWorks (2017) и Ansys CFX 17.1 [21, 22].

Нелинейные дифференциальные уравнения сохранения энергии для обрабатываемого расплава и элементов установки записывались в виде субстанциональной производной:

$$\rho_i c_i(t) \frac{Dt_i}{d\tau} = \rho_i c_i(t) \frac{\partial t_i}{\partial \tau} + \rho_i c_i(t) \operatorname{div}(w_i t_i) = \lambda_i \nabla^2 t_i + q_{vi}, \quad (1)$$

где t_i – поле температур в i -м элементе; ρ_i , c_i и λ_i – плотность, объемная теплоемкость и теплопроводность i -го элемента; w_i – вектор угловой скорости движения i -го элемента в теле кристаллизатора и расплава; q_{vi} – функция, характеризующая тепловые источники (внутреннее тепловыделение при фазовом переходе и прессовании металла) в i -м элементе.

В математической модели использовалась цилиндрическая система координат (см. рис. 1), где входящие в системы дифференциальных уравнений (1) дивергенция и оператор Лапласа имели следующий вид:

$$\operatorname{div} = \frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial z}; \quad (2)$$

$$\nabla^2 t_i = \left\{ \frac{\partial^2 t_i}{\partial R_i^2} + \frac{1}{R_i} \frac{\partial t_i}{\partial R_i} + \frac{1}{R_i^2} \frac{\partial^2 t_i}{\partial \varphi_i^2} + \frac{\partial^2 t_i}{\partial z_i^2} \right\}. \quad (3)$$

Уравнение (1) дополнялось краевыми условиями:

$$t_i = t_0(R, z, \varphi, \tau = 0); w_i = (R, z, \varphi, \tau) = \text{const}; \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{\Gamma_i} = \pm q_i. \quad (4)$$

Здесь q_i – функция, характеризующая условия радиационно-конвективного теплообмена на границе поверхности i -го элемента Γ_i ($q_i > 0$ – тепловой поток направлен внутрь элемента).

В краевых условиях (4) угловая скорость движения элементов установки w_i относительно оси Z присуща только вращающимся элементам изучаемой системы: колесу-кристаллизатору и затвердевающему в его канавке расплаву. Для остальных элементов расчетной модели $w_i = 0$. Энтальпия заливаемого в установку расплава рассчитывается исходя из принятых начальных значений его температуры и расхода, функционально связанного с величиной w_i .

Результаты исследования и их обсуждение

Численное исследование процесса непрерывного совмещенного литья-прессования проведено при заливке в установку опытного эвтектического алюминиевого сплава АК12 с температурой плавления (затвердевания) 580 °С. При анализе температурно-временных характеристик переходного теплового процесса в качестве режимного параметра принята скорость вращения колеса кристаллизатора w_k , диапазон изменения которой варьировался в пределах 1–3 об/мин. Температура заливаемого расплава t_p принималась равной 750 °С, окружающей среды – 20 °С.

В соответствии с задаваемой величиной w_k массовый расход заливаемого расплава (производительность установки) G_p принимал значения 0,27–0,81 кг/мин. Отметим, что пропорционально величине G_p в уравнении (1) изменялось и количество теплоты, поступающее в установку с заливаемым металлом.

Результаты моделирования динамики теплообмена в переходном тепловом процессе свидетельствуют о существенном влиянии скорости вращения горизонтального колеса-кристаллизатора на темп его разогрева и, как следствие, на характер температурного поля в теле инструмента и затвердевающего расплава.

На рис. 2 показаны рассчитанные в ходе переходного теплового процесса изотермы t_1 , t_2 и t_3 , соответствующие значению температуры по сечению тела кристаллизатора 700, 650 и 600 °С, при $t_p = 750$ °С и скорости вращения колеса-кристаллизатора $w_k = 1$ и 3 об/мин.

Как видно, на протяжении переходного теплового процесса $\tau_{пр}$ происходит изменение местоположения рассматриваемых изотерм, связанного с изменением темпа нагрева кристаллизатора. Так, при скорости вращения кристаллизатора $w_k = 3$ об/мин изотерма с температурой $t_1 = 700$ °С в периоды времени $\tau_{пр} = 320$ и 840 с занимает дуговой отрезок $\Delta\varphi_i$, равный 0,12π и 0,21π м. При $w_k = 1$ об/мин $\tau_{пр}$ длина этих дуговых отрезков за указанные периоды снижается соответственно до 0,05π и 0,08π м.

Анализ показывает, что в начальный момент времени после пуска установки в системе «расплав – инструмент» основная часть теплоты идет на нагрев кристаллизатора. При этом чем больше подводится теплоты с расплавом, тем быстрее происходит нагрев кристаллизатора и, соответственно, сокращается время выхода на стационарный тепловой режим работы установки в целом. Определено, что при изменении скорости вращения кристаллизатора от 1 до 3 об/мин время выхода на стационарный тепловой режим ($\tau_{ст}$) уменьшается практически в три раза (с 46 до 15 мин).

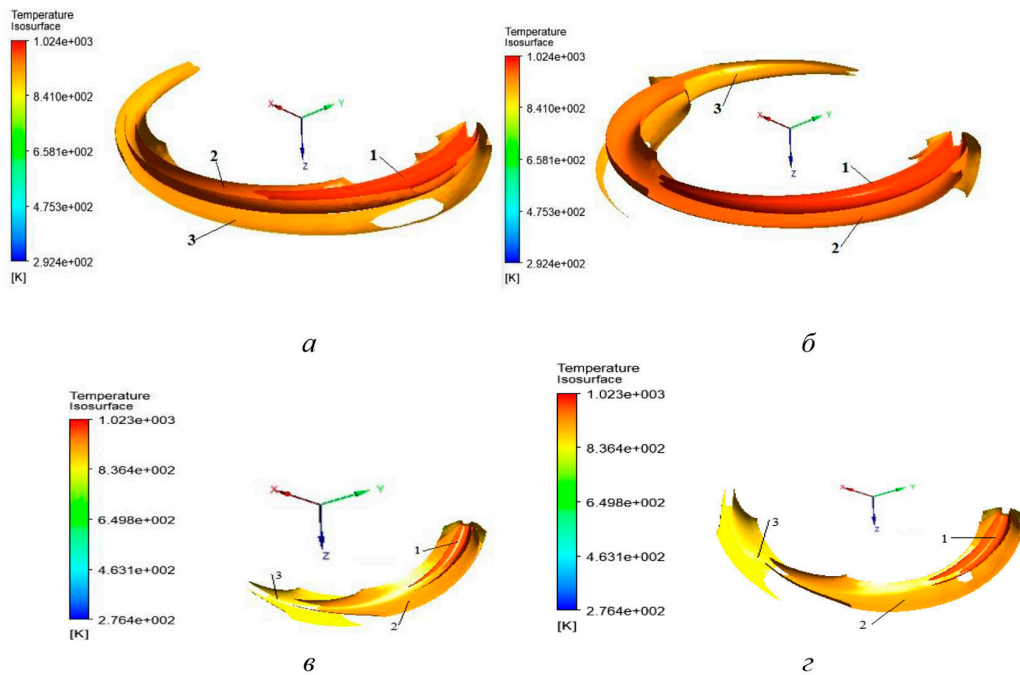


Рис. 2. Значения изотерм t_i в теле кристаллизатора в переходном тепловом процессе при $t_p = 750$ °C: 1 – $t_1 = 700$ °C, 2 – $t_2 = 650$ °C, 3 – $t_3 = 600$ °C; а – $\tau_{пр} = 320$ с, $w_k = 3$ об/мин; б – $\tau_{пр} = 840$ с, $w_k = 3$ об/мин; в – $\tau_{пр} = 320$ с, $w_k = 1$ об/мин; г – $\tau_{пр} = 840$ с, $w_k = 1$ об/мин

Fig. 2. The values of the t_i isotherm in the crystallizer body in a continuous thermal process at $t_R = 750$ °C: 1 – $t_1 = 700$ °C, 2 – $t_2 = 650$ °C, 3 – $t_3 = 600$ °C; а – $\tau_{pr} = 320$ s, $w_k = 3$ turnover/min; б – $\tau_{pr} = 840$ s, $w_k = 3$ turnover/min; в – $\tau_{pr} = 320$ s, $w_k = 1$ turnover/min; г – $\tau_{pr} = 840$ s, $w_k = 1$ turnover/min

Установлено, что в переходном тепловом процессе кристаллизатор имеет две температурно-временные зоны нагрева, характеристики которых зависят от скорости его вращения (производительности установки).

В первой зоне происходит интенсивный теплообмен между расплавом металла и стенками колеса-кристаллизатора. Анализ показывает, что при $t_p = 750$ °C и $G_p = 0,81$ кг/мин ($w_k = 3$ об/мин) интервал времени от момента пуска установки до прохождения данной зоны $\Delta\tau_{пр}$ составляет 320 с. При этом скорость изменения средней температуры кристаллизатора в первом расчетном сечении по ходу его вращения (φ_1) $\Delta\bar{t}_k / \Delta\tau_{пр} = 15,3$ °C/мин, а максимальный градиент температуры между стенкой кристаллизатора и периферийным слоем расплава в канавке $\text{grad}t_{кр} = 87$ °C/мм (рис. 3).

Расчеты показали, что снижение производительности установки до $G_p = 0,27$ кг/мин ($w_k = 1$ об/мин) увеличивает длительность первой температурно-временной зоны $\Delta\tau_{пр}$ от 0 до 450 с. При этом заметно уменьшаются $\Delta\bar{t}_k / \Delta\tau_{пр}$ и $\text{grad}t_{кр}$, значения которых в сечении φ_1 составляют 4,78 °C/мин и 23 °C/мм соответственно (рис. 4).

Во второй зоне скорость отвода теплоты от расплава к кристаллизатору снижается, а длина дуги затвердевания расплава увеличивается. Так, в рассматриваемом сечении φ_1 при $w_k = 3$ об/мин значения $\Delta\bar{t}_k / \Delta\tau_{пр}$ и $\text{grad}t_{кр}$ снижаются соответственно до 4,5 °C/мин и 2,3 °C/мм. При $w_k = 1$ об/мин эти величины принимают соответствующие значения 1,82 °C/мин и 4,2 °C/мм.

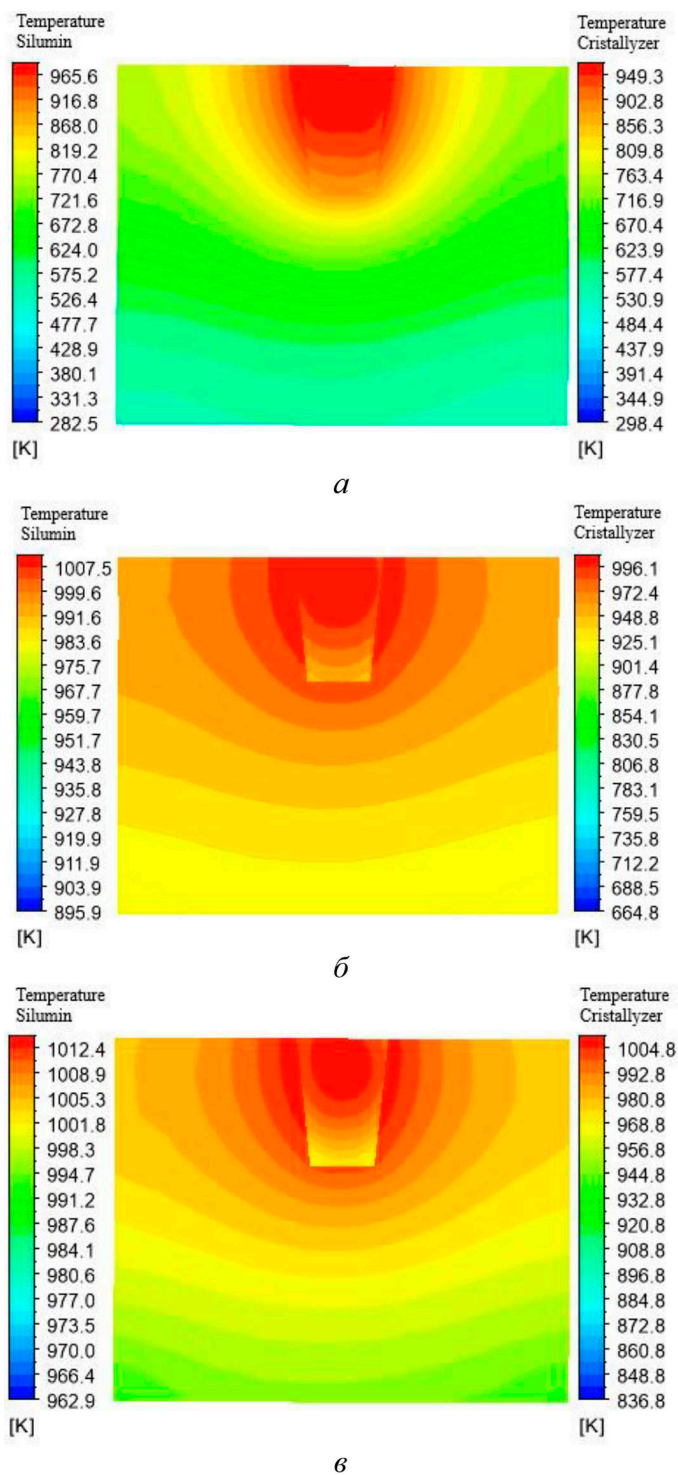


Рис. 3. Температурное поле (K) в расчетном сечении металла и кристаллизатора $\phi_1 = 30^\circ$ при $t_p = 750^\circ\text{C}$, $w_k = 3$ об/мин: *a* – $\tau_{np} = 60$ с; *б* – $\tau_{np} = 320$ с; *в* – стационарный тепловой режим

Fig. 3. Temperature field (K) in the calculated cross section of the metal and the mold $\phi_1 = 30^\circ$ at $t_p = 750^\circ\text{C}$, $w_k = 3$ turnover/min: *a* – $t_p = 60$ s; *b* – $t_p = 320$ s; *c* – stationary thermal regime

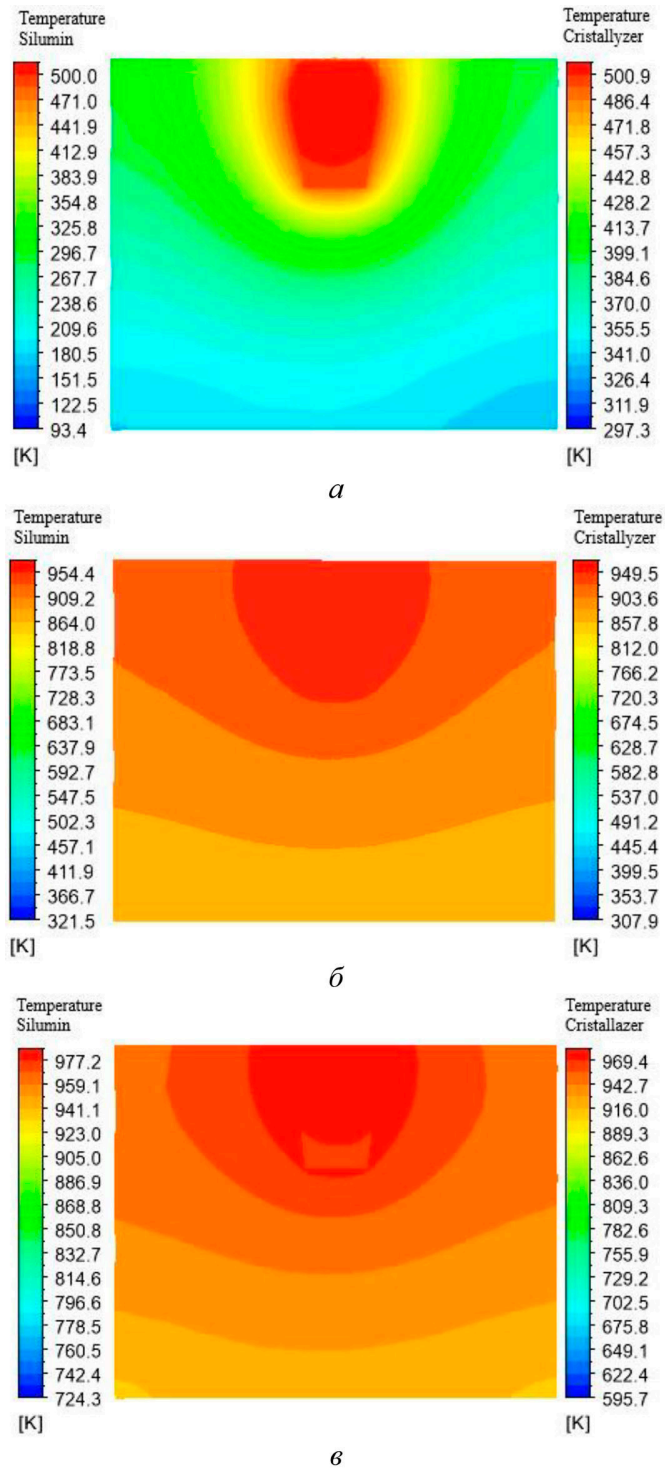


Рис. 4. Температурное поле (K) в расчетном сечении металла и кристаллизатора $\phi_1 = 30^\circ$ при $t_p = 750^\circ\text{C}$, $w_k = 1$ об/мин: *a* – $\tau_{np} = 60$ с; *b* – $\tau_{np} = 450$ с; *c* – стационарный тепловой режим

Fig. 4. Temperature field (K) in the calculated cross section of the metal and the mold $\phi_1 = 30^\circ$ at $t_p = 750^\circ\text{C}$, $w_k = 1$ turnover/min: *a* – $t_p = 60$ s; *b* – $t_p = 450$ s; *c* – stationary thermal regime

На рис. 5 представлены обобщенные температурно-временные зависимости, полученные в период переходного теплового процесса при различной производительности установки в расчетных сечениях φ_i тела кристаллизатора и затвердевающего расплава.

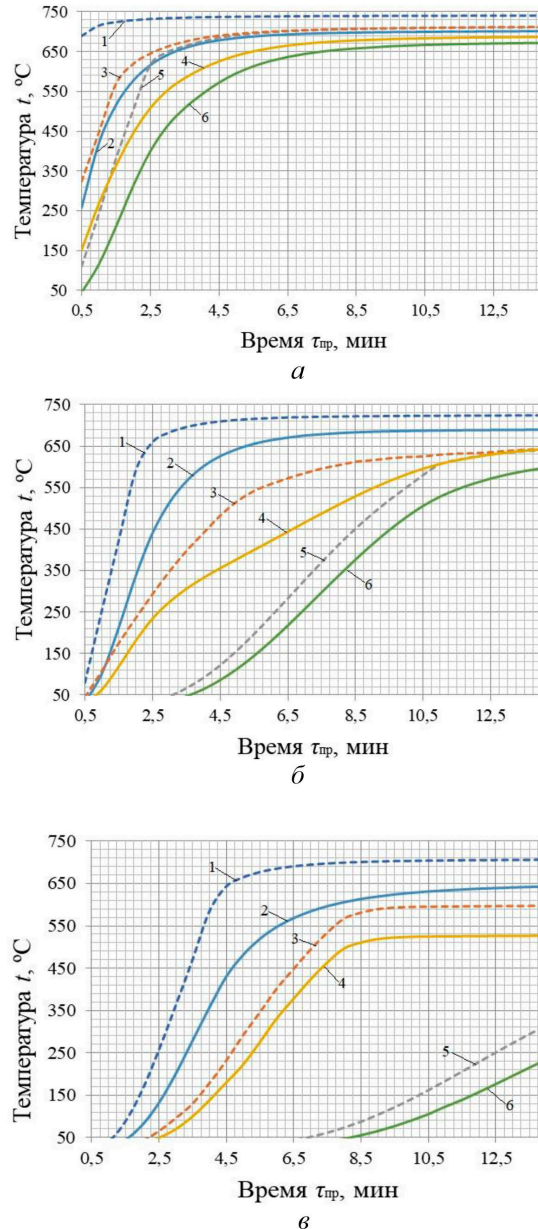


Рис. 5. Изменение температуры в теле кристаллизатора и металла в расчетных сечениях φ_i в переходном тепловом режиме: 1, 2 – температура металла и кристаллизатора при $w_k = 3$ об/мин; 3, 4 и 5, 6 – температура металла и кристаллизатора при $w_k = 2$ об/мин и 1 об/мин соответственно; а – $\varphi_1 = 30^\circ$; б – $\varphi_2 = 120^\circ$; в – $\varphi_3 = 210^\circ$

Fig. 5. Temperature change in the body of the mold and metal in the calculated cross sections φ_i in the transient thermal regime: 1, 2 – the temperature of the metal and the mold at $w_k = 3$ turnover/min; 3, 4 and 5, 6 – the temperature of the metal and the mold at $w_k = 2$ turnover/min and 1 turnover/min, respectively; а – $\varphi_1 = 30^\circ$; б – $\varphi_2 = 120^\circ$; в – $\varphi_3 = 210^\circ$

Видно, что характер температурного поля кристаллизатора и металла меняется как на протяжении $\Delta t_{\text{пр}}$ от момента пуска установки до выхода ее на стационарный тепловой режим, так и по ходу их движения от точки заливки до зоны прессования. С увеличением производительности установки возрастает в расчетных сечениях φ_i температура кристаллизатора и обрабатываемого сплава, что связано с увеличением поступающей в процесс литья-прессования теплоты с заливаемым расплавом.

При увеличении скорости вращения кристаллизатора до 3 об/мин в период протекания переходного процесса возрастает несимметричность температурного поля в расчетных сечениях металла φ_2 и φ_3 . Область с максимальной температурой сдвигается к поверхностным слоям металла, контактирующего с окружающей средой. При снижении скорости до 1 об/мин смещение температурного поля с максимальной температурой по сечению металла незначительно. В расчетных сечениях φ_2 и φ_3 область с максимальной температурой смещается в сторону их центральной части.

Расчеты показывают, что при $w_k \leq 1,75$ об/мин проектная конструкция установки при выходе на стационарный тепловой режим обеспечивает в третьем контрольном сечении φ_3 перед зоной прессования температуру затвердевающего расплава ниже точки его фазового перехода за счет достаточного теплоотвода в окружающую среду.

Заключение

1. Проведено численное исследование влияния производительности установки G_k на характеристики нестационарного теплообмена при непрерывном совмещенном литье-прессовании опытного алюминиевого сплава АК12.

2. Дана количественная оценка влияния G_k (w_k) на темп разогрева кристаллизатора. Установлено существенное влияние w_k на характер температурного поля в теле инструмента и затвердевающего расплава в период переходного теплового процесса.

3. Определены две температурно-временные зоны, характеризующиеся различной интенсивностью теплообмена между расплавом и стенками кристаллизатора.

4. Показано, что увеличение w_k приводит к практическому линейному сокращению продолжительности переходного теплового процесса при пуске установки из холодного состояния до достижения ею стационарного теплового режима.

Список литературы / References

[1] Rocha J. R., Souza E. E., Marcondes F., Castro J. A. Modeling and computational simulation of fluid flow, heat transfer and inclusions trajectories in a tundish of a steel continuous casting machine. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. 8(5), 4209–4220.

[2] Jiang Y., Mao X., Lei Y., Liu X., Xie J. Microstructure and mechanical property evolutions of CuNi10Fe1.8Mn1 alloy tube produced by HCCM horizontal continuous casting during drawing and its deformation mechanism. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. 771. 905–913.

[3] Glazoff M. V., Khvan A. V., Zolotarevsky V. S., Belov N. A., Dinsdale A. T. *Chapter 3: Influence of Heat Treatment Upon Microstructure of Casting Aluminum Alloys Casting Aluminum Alloys*. 2019. 2. 235–312.

[4] Feifan Wang, Ma Qingxian, Han W. M., Zhiqiang. Experimental study on the heat transfer behavior and contact pressure at the casting-mold interface in squeeze casting of aluminum alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. 112. 1032–1043.

- [5] Luo Y., Zhang Z. Numerical modeling of annular electromagnetic stirring with intercooling in direct chill casting of 7005 aluminum alloy billet. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2019. 29, 1. 81–87.
- [6] Garg P., Jamwal A., Kumar D., Sadasivuni K. K., Gupta P. Advancere search progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. 8. 5. 4924–4939.
- [7] Gu C., Lu Y., Cinkilic E., Miao J., Luo A. A. Predicting grain structure in high pressure die casting of aluminum alloys: A coupled cellular automaton and process model. *Computational Materials Science*. 2019. 161. 64–75.
- [8] Dong X., Yang H., Zhu X., Ji Shouxun. High strength and ductility aluminium alloy processed by high pressure die casting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. 773. 86–96.
- [9] Крюков И. Ю., Наумова М. Г., Вдовин К. Н., Ларина Т. П. Разработка математической модели теплового состояния кристаллизующейся заготовки прямоугольного сечения в горизонтальной машине полунепрерывного литья. *Технические науки*. 2016. 10. 306–311. [Kryukov I. Yu., Naumova M. G., Vdovin K. N., Larina T. P. Development of a mathematical model of the thermal state of a crystallizing rectangular billet in a horizontal semi-continuous casting machine. *Technical sciences*. 2016. 10. 306–311.] (in Russian).
- [10] Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Беляев С. В., Солдатов С. В., Беспалов В. М., Леонов В. В. Совершенствование конструкции опытно-промышленной установки СЛИПП-2,5. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*.– 2012. 5. 7, 817–828. [Dovzhenko N. N., Sidelnikov S. B., Belyaev S. V., Soldatov S. V., Bepalov V. M., Leonov V. V. Improving the design of the experimental industrial installation SLIP-2,5. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2012. 5. 7, 817–828. (in Russian)]
- [11] Biancotti E. (Fata Huner). A revolutionary approach high speed thin casting. *Theory and Technology of Plastic Deformation Processes: Proceedings of the Symposium. GTU-MISIS*. 1995. 184–189.
- [12] Jarry P., Rappaz M. Recent advances in the metallurgy of aluminium alloys. Part I: Solidification and casting. *Comptes Rendus Physique*. 2018. 19(8). 672–687.
- [13] Niinomi M. Casting. *Metals for Biomedical Devices*. 2019. 2. 311–330.
- [14] Потапенко А. С., Скуратов А. П., Горохов Ю. В. Динамика затвердевания алюминиевого сплава при нестационарном тепловом режиме установки непрерывного литья и прессования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. 21(7). 109–118. [Potapenko A. S., Skuratov A. P., Gorokhov Yu. V. Dynamics of solidification of aluminum alloy under non-stationary thermal regime of continuous casting and pressing plant. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2017. 21(7). 109–118. (in Russian)]
- [15] Скуратов А. П., Потапенко А. С., Горохов Ю. В. Исследование тепловой работы установки непрерывного литья и прессования алюминия в переходном режиме. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2017. 10(3), 337–345. [Skuratov A. P., Potapenko A. S., Gorokhov Yu. V. Investigation of the thermal operation of a continuous casting and pressing of aluminum in a transient mode. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2017. 10(3), 337–345. (in Russian)]
- [16] Скуратов А. П., Горохов Ю. В., Потапенко А. С., Беляев С. В., Губанов И. Ю., Иванов А. Г. Устройство управления тепловым режимом установки непрерывного литья и прессо-

вания цветных металлов и сплавов: Пат. 2657396 (РФ). 2018. [Skuratov A. P., Gorokhov Yu.V., Potapenko A. S., Belyaev S. V., Gubanov I. Yu., Ivanov A. G. Thermal mode control device for continuous casting and pressing of non-ferrous metals and alloys: Pat. 2657396 (RF). 2018. (in Russian)]

[17] Семашко М. Ю., Чигинцев П. А. Комплексное исследование процесса интенсивной пластической деформации алюминиевого сплава. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2016. 16(2). 63–67. [Semashko M. Yu., Chigintsev P. A. Comprehensive study of the process of intensive plastic deformation of aluminum alloy. *Bulletin of SUSU. The Metallurgy series*. 2016. 16(2). 63–67. (in Russian)].

[18] Торговец А. К., Пикалова И. А., Юсупова Ю. С. *Моделирование в процессах непрерывного литья*. Карагандинский государственный индустриальный университет. 2016. 6(28). 88–95. [Merchant A. K., Pikalova I. A., Yusupova Yu. S. *Modeling in continuous casting processes*. Karaganda State Industrial University. 2016. 6(28). 88–95. (in Russian)]

[19] Диденко В. А., Бондаренко А. Ф., Полено А. Н. *Математическое моделирование электрогидравлического привода механизма качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок*. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». 2015. 4(121). 93–98. [Didenko V. A., Bondarenko A. F., Poleno A. N. *Mathematical modeling of the electrohydraulic drive of the swing mechanism of the mold of the continuous casting machine of blanks*. National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. 2015. 4(121). 93–98. (in Russian)]

[20] Фомина Е. Е., Жиганов Н. К. *О модификации алгоритма SIMPLER для решения задачи моделирования процесса непрерывного литья заготовок из цветных металлов*. ТвГТУ. 2016. 12(1). 32–35. [Fomina E. E., Zhiganov N. K. *About modification of the SIMPLER algorithm for solving the problem of modeling the process of continuous casting of blanks from non-ferrous metals*. TvSTU. 2016. 12(1). 32–35. (in Russian)]

[21] Скуратов А. П., Потапенко А. С., Горохов Ю. В., Попиякова Н. П. Расчетное исследование влияния перегрева алюминиевого расплава на теплообмен при непрерывном совмещенном процессе литья-прессования. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. 2. 26–34. [Skuratov A. P., Potapenko A. S., Gorokhov Yu.V., Popiyakova N. P. Computational study of the effect of overheating of aluminum melt on heat exchange in a continuous combined casting-pressing process. *News of universities. Non-ferrous metallurgy*. 2019. 2. 26–34. (in Russian)]

[22] Минаков А. В., Первухин М. В., Платонов Д. В., Хацаюк М. Ю. Математическая модель и численное моделирование процесса литья и кристаллизации алюминия в магнитном поле с учетом свободной поверхности. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2015. 12. 2094–2108. [Minakov A. V., Pervukhin M. V., Platonov D. V., Khatsayuk M. Yu. Mathematical model and numerical modeling of the casting and crystallization of aluminum in a magnetic field taking into account the free surface. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2015. 12. 2094–2108. (in Russian)]