

В. С. Дорошенко, В. П. Кравченко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЗАИМОСВЯЗАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В ПЕСЧАНОЙ ФОРМЕ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ОДНОРАЗОВЫМ ЛИТЕЙНЫМ МОДЕЛЯМ

В настоящее время при исследовании закономерностей разнообразных изменений состояния вещества, нельзя целиком полагаться на знание законов, описывающих лишь одну из возможных форм движения материи. Термические, химические, механические, электрические, магнитные и т. п. свойства вещества взаимосвязаны, и пренебрегать некоторыми из них можно лишь в отдельных случаях. В работе (применительно к литейным процессам в песчаной литейной форме) отражены основные принципы теории переноса, которые являются предметом термодинамики неравновесных процессов.

Ключевые слова: процессы переноса, термодинамика, необратимые процессы, тепловой поток, песчаная форма, литейные модели

Технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) в процессе замещения расплавленным металлом пенопластовой модели и фильтрации ее продуктов сквозь песок сопровождается весьма сложными разнообразными явлениями, лежащими в пограничных областях фундаментальных дисциплин: механики жидкостей и газов, термодинамики, теории теплообмена, гидродинамики, физической химии и других, исследование и количественное описание явлений на стыках которых вызывает необходимость использования теоретических понятий и концепций этих дисциплин с точки зрения теории литейной формы. С даты первого изобретения технологии ЛГМ прошло более 50 лет. Она остается наукоемкой и по эффективности производства, экологической безопасности, инновационному потенциалу, и относится к высоким технологиям литейного производства, которые сохраняют значительные возможности своего развития.

В концепции технологии ЛГМ с использованием вакуумируемой формы создано ряд разновидностей, включая способ литья по ледяным моделям, впитываемым при их таянии в толщу песка формы, с освобождением полости формы под заливку металлом, без аналитического описания и выяснения присущих этим способам явлений, лежащих на стыках естественных наук. Дальнейшее их развитие и внедрение в производство крайне затруднительно. Цель настоящей статьи — кратко охарактеризовать явления, наблюдаемые в песчаной литейной форме при литье по одноразовым моделям в свете теории переноса.

Среди большого количество феноменологических (то есть основанных на опыте) законов, описывающих необратимые процессы в виде пропорциональностей, для нашего случая наиболее пригодны такие, которые отражают суть механизма переноса [1]. В первоначальной формулировке законов переноса потоки того или иного свойства

пропорциональны градиенту этого свойства. Так, поток тепла пропорционален градиенту температуры (закон Фурье); поток вещества — градиенту концентрации (закон Фика). Далее, закон Дарси отражает пропорциональность фильтрационного потока градиенту давлений; закон Ньютона — пропорциональность силы внутреннего трения градиенту скорости; закон пропорциональности скорости химической реакции — градиенту химического потенциала и т. п. Явления, описываемые перечисленными законами, в той или иной мере типичны для песчаной литейной формы. Более того, всегда не менее двух и более таких процессов протекают одновременно в одних и тех же местах пространства или песчаных слоях литейной формы, они налагаются друг на друга и вызывают появление новых эффектов. При этом без следующих, как минимум, трех процессов не обходится реальное функционирование песчаной формы, в частности, получаемой путем впитывания продуктов деструкции одноразовой модели в толщу песка.

Перенос вещества через пористую стенку песчаной формы вследствие перепада давлений Δp (вызванный плавлением и газификацией модели при ЛГМ, таянием ледяной модели, а также вакуумированием песка формы) описывается как явление фильтрации (капиллярного течения). При этом объемный поток J_v пропорционален перепаду давлений (закон Дарси): $J_v = -L_v \Delta p$, где L_v — коэффициент фильтрации.

Согласно первому закону Фика [2], диффузионный поток пропорционален градиенту концентрации, то есть вещество перемещается из области, где его больше в область, где его меньше. В проницаемой стенке песчаной формы этот процесс приводит к выравниванию концентраций и установлению материального равновесия, что в соответствии с законом Фика: $J_k = L_k \Delta c$, где L_k — коэффициент диффузии вещества, Δc — перепад его концентрации.

Заливка расплавом литейной формы и дальнейший ее теплообмен с металлом отливки нарушает тепловое равновесие системы, и, неизбежно, на упомянутые процессы накладывается процесс теплопроводности (переноса тепла под действием градиента или перепада температур ΔT), описываемый законом Фурье: $J_q = -L_q \Delta T$, где L_q — коэффициент теплопроводности.

Среди множества перекрестных эффектов, когда градиент одного свойства вызывает градиент и, следовательно, поток другого свойства, наиболее известными являются термоэлектрические эффекты: эффект Пельтье — появление разницы температур при протекании электрического тока через систему, состоящую из разнородных проводников; термо-ЭДС — возникновение электродвижущей силы в системе из разнородных металлов, находящихся при разных температурах; термодиффузия, когда градиент температур приводит к градиенту концентраций [2].

Все законы переноса основываются на опыте. При этом коэффициенты пропорциональности, характеризующие эффекты наложения, находятся тем же экспериментальным путем, что и коэффициенты теплопроводности, электропроводности, диффузии, трения и т. п. Недостатком эмпирического подхода является отсутствие общей теории таких процессов, которая указывала бы на связь двух или более налагающихся процессов, позволяла предсказать количество возможных эффектов такого рода, систематизировать их, дать единое методологическое их описание, установить факторы, влияющие на величину этих эффектов и возможность их практического использования [1]. Решительный шаг в направлении положительного решения этой проблемы был сделан Л. Онсагером, которому была присуждена Нобелевская премия по химии за «формулировку соотношений взаимности..., имеющих важное значение для термодинамики необратимых процессов» [2]. Его работы положили начало развитию научного направления, получившего название термодинамики необратимых процессов (ТНП), что привело к созданию весьма общего макрофизического метода исследования кинетики разнообразных процессов в их неразрывной связи с тепловой формой движения. В своих основах ТНП базировалась не только на термодинамике, но и ряде постулатов и соображений статистико-механического характера. Одним из таких постулатов (получившим название принципа линейности) явилось предположение Л. Онсагера о том, что вблизи равновесия (в системах, обменивающихся теплом, работой и веществом с окружающей средой при не слишком больших отклонениях от термодинамического равновесия) обобщенная скорость какого-либо релаксационного процесса (названная им потоком J_i) линейно зависит от всех действующих в системе термодинамических сил X_j [1]:

$$J_i = \sum_j L_{ij} X_j. \quad (1)$$

Здесь L_{ij} — так называемые «феноменологические» коэффициенты, характеризующие проводимость системы по отношению к потоку J_i .

Такая (матричная) форма кинетических уравнений отличалась от законов Фурье, Ома, Фика, Дарси, Ньютона и т. п. наличием дополнительных (недиагональных) членов (с номерами $j \neq i$). Эти члены были введены Л. Онсагером для учета обнаруженной в экспериментах взаимосвязи разнородных явлений, которую он объяснял «наложением» разнородных потоков и отразил в так называемых «соотношениях взаимности», утверждавших симметричность матрицы феноменологических коэффициентов

$$L_{ij} = L_{ji}. \quad (2)$$

Эти соотношения были получены Л. Онсагером на основании известного положения статистической механики об обратимости микропроцессов во времени в предположении, что коэффициенты L_{ij} и L_{ji} постоянны, а разноименные потоки J_i и J_j линейно независимы и обращаются в нуль при исчезновении сил X_i и X_j .

Методами приложения ТНП к решению задач литейного производства при рассмотрении сложных реальных явлений, сколь угодно отклоняющиеся от состояния равновесия, посвящено ряд работ А. И. Вейника [3, 4]. Он отмечал, что при подготовке формы и металла, формировании отливки и ее дальнейшей обработке литейщику приходится сталкиваться с большим числом явлений — термических, механических, химических, фазовых, поверхностных, волновых (вибрационных), гидродинамических, фильтрационных, упругих, пластических и т. д., которые органически связаны между собой и, так или иначе, влияют на качество готового изделия. В комплексе (с учетом взаимного влияния) все эти явления могут быть рассмотрены методами термодинамики необратимых (реальных) процессов.

В работе [4] с целью повышения практического значения теории приводятся примеры использования теории ТНП при анализе процессов испарения и конденсации, плавления и затвердевания, что приближает ее к удобным и универсальным методам исследования разнообразных процессов переноса независимо от их принадлежности к тем или иным областям теории литейных процессов, касающихся удаления одноразовой модели, фильтрации продуктов модели сквозь пористое пространство песка формы или кристаллизацию отливки. Процессы испарения и конденсации, плавления и затвердевания А. И. Вейник аналогично (1) описывает следующей совокупностью уравнений, учитывающих фазовую, диффузионную, термическую, механическую и электрическую (всего в количестве 5) связанные внутренние степени свободы системы:

$$J_i = - \sum_{r=1}^{r=5} \alpha_{ir} \delta P_r, \quad \text{где } i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad (3)$$

а по аналогии с (2):

$$\alpha_{ir} = \alpha_{ri}, \quad (4)$$

где J_i – поток заряда (фазовой массы m_ϕ , диффузионной массы m_d , термического заряда S , объема V и электрического заряда ψ), α – коэффициент отдачи заряда (основной или перекрестный) на поверхности испарения или плавления; δP – разность (напор) потенциала между поверхностью и окружающей средой (разность фазовых $\delta\mu_\phi$ и диффузионных $\delta\mu_d$ потенциалов, температур δT , давлений δp и электрических $\delta\phi$ потенциалов). Термический, механический и электрический эффекты при фазовом превращении определяются отношением соответствующих потоков:

$$s = J_s/J_\phi, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град}), \quad (5)$$

$$h = J_v/J_\phi, \text{ м}^2/\text{кг}, \quad (6)$$

$$q = J_\psi/J_\phi, \text{ к}/\text{кг}. \quad (7)$$

Первая формула (5) характеризует количество перенесенного термического заряда при переносе 1 кг фазовой массы (при испарении 1 кг жидкости или расплавлении 1 кг твердого тела), вторая (6) – количество перенесенного объема и третья (7) – количество перенесенного электрического заряда. В неравновесных условиях термический (s), механический (h) и электрический (q) эффекты зависят от напоров всех потенциалов и меняются с изменением степени необратимости процесса.

К затронутой в настоящей статье теме процессов переноса авторов привел анализ взаимосвязанных явлений при регулировании скорости охлаждения отливки в вакуумируемой песчаной форме при ЛГМ. Ускорения охлаждения отливки достигали путем дозированного введения в песок формы газообразного и жидкого (воды) хладагентов в контактной зоне отливки с формой и удаления их по вакуум-системе из литейной формы. При этом получали интенсивный поток хладагента, отводящий тепло отливки путем создания принудительной конвекции, которая по величине часто превышала традиционную составляющую для литейной формы – тепловой поток за счет теплопроводности материала формы [5].

После проведения свыше восьмидесяти экспериментов по записыванию методом термического анализа температурных кривых в различных точках песка формы по мере отдаления спаев термопар от кристаллизующейся из расплава и охлаждающейся цилиндрической чугуновой отливки радиусом R определяли в различные моменты времени значения коэффициента теплоотдачи α , используя математическое выражение на основании закона Ньютона-Рихмана в следующем виде:

$$\alpha = \frac{q_k}{S(R)(T_R - T_{R+l})|_{\tau_0}},$$

где q_k – конвективный тепловой поток, математическое выражение которого вывели путем построения теплового баланса охлаждения отливки в форме с использованием закона Фурье и который определяли на основании кривых охлаждения; $S(R)$ – площадь поверхности цилиндрической отливки; $(T_R - T_{R+l})|_{\tau_0}$ – температурный напор от поверхности отливки в момент времени t_0 , определяемый по кривых охлаждения, l – толщина слоя (в котором определяли температурный напор) песка от отливки до спая термопары.

С другой стороны, в работе [4] с помощью уравнений (3) предложено аналитическое выражение этого же коэффициента в виде эффективного значения коэффициента теплоотдачи α_ϕ с учетом комплексного влияния на процесс теплообмена следующих явлений: кипения (или плавления), диффузии, разностей давлений и электрических потенциалов

$$\alpha_\phi = -\alpha_{sf} T_\phi (\delta\mu_\phi / \delta T) - \alpha_{sd} T_\phi (\delta\mu_d / \delta T) - \alpha_{OQ} - \alpha_{sv} T_\phi (\delta p / \delta T) - \alpha_{s\psi} T_\phi (\delta\phi / \delta T), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}),$$

где α_{OQ} – обычный (термический) коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град). Анализ показывает, что при наличии фазового превращения (кипения и плавления) интенсивность теплоотдачи увеличивается в десятки раз, диффузии – в несколько раз, электрообмена – в десятки и сотни раз и т. д.

До сих пор такой подход к изучению процессов переноса и преобразования энергии в реальных необратимых процессах может выглядеть не совсем обычным (в отличие от более привычных представлений и методов классической термодинамики). В настоящее время, исследуя закономерности разнообразных изменений состояния вещества, нельзя целиком полагаться на знание законов, описывающих лишь одну из возможных форм движения материи. Термические, химические, механические, электрические, магнитные и т. п. свойства вещества взаимосвязаны, и пренебрегать некоторыми из них можно лишь в отдельных случаях. Для песчаной литейной формы в процессе удаления одноразовой модели через толщу песка характерны указанные случаи с эффектами наложения разнородных явлений переноса, описание взаимосвязи между ними, которые с других точек зрения далеко не очевидны, может изменять систему сложившихся представлений, побуждая к новым исследованиям. Тем самым кроме выяснения закономерностей описанные концепции имеют методическое значение постановки проблемных задач с выявлением направлений их решений в многообразных явлениях переноса, в частности, присущих в литейных процессах.



Литература

1. Эткин В. А. На стыках естественных наук. <http://zhurnal.lib.ru>.
2. Бокштейн Б. С. Термодиффузия. Соросовский Образовательный журнал. 1999. <http://www.pereplet.ru>.
3. Вейник А. И. Термодинамика необратимых процессов. — Минск: Вышэйшая шк. 1966. — 359 с.
4. Вейник А. И. Метод приложения термодинамики необратимых процессов к решению задач литейного производства. Сборник «Теплообмен между отливкой и формой», под ред. Вейника А. И. — Минск: Вышэйшая шк., 1967. — С. 5-17.
5. Дорошенко В. С., Кравченко В. П. // Определение коэффициента теплоотдачи при охлаждении отливки в песчаной форме с принудительной конвекцией хладагента: Тез. докл. «Литье-2008» — Киев, 2008. — С.143-145.

ДОРОШЕНКО В. С., КРАВЧЕНКО В. П. Взаємозв'язані процеси перенесення в піщаній формі при литві по одноразових моделях

В даний час при дослідженні закономірностей всіляких змін стану речовини не можна цілком покладатися на знання законів, що описують лише одну з можливих форм руху матерії. Термічні, хімічні, механічні, електричні, магнітні і т. п. властивості речовини взаємозв'язані, і нехтувати деякими з них можна лише в окремих випадках. У роботі (із стосовно ливарних процесів в піщаній ливарній формі) відображені основні принципи теорії перенесення, які є предметом термодинаміки нерівноважних процесів.

DOROSHENKO V., KRAVCHENKO V. Associate processes of transfer in a sandy form at casting on non-permanent models

Presently at research of conformities to law of various changes of the state of matter, it is impossible wholly to depend upon knowledge of laws, describing only one of possible forms of motion of matter. Thermal, chemical, mechanical, electric, magnetic etc. properties of matter are associate, and to ignore some it is possible only on occasion of them. In-process with as it applies to castings processes in a sandy casting form basic principles are reflected theories of transfer, which are the article of thermodynamics of non-equilibrium processes.

Расценки на размещение рекламы

(цены приведены в гривнах с учетом налога на рекламу)

2, 3 страницы обложки		страница внутри журнала	
цветная	1400	цветная	1050
черно-белая	700	черно-белая	500
1/2 страницы формата А4		1/2 страницы формата А4	
цветная	900	цветная	800
черно-белая	500	черно-белая	450
1/4 страницы формата А4		1/4 страницы формата А4	
цветная	550	цветная	300
черно-белая	300	черно-белая	200

При повторном размещении рекламы – скидка 15 %