

УДК 536.4

ИНТЕНСИВНАЯ ЭМИССИЯ КАПЕЛЬ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКТОРЕ¹

© 2023 г. Т. И. Бородин¹, В. В. Глазков², Ю. П. Ивочкин¹*, К. Г. Кубриков¹,
О. А. Синкевич^{1, 2}, И. О. Тепляков¹, С. М. Юдин^{1, 2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Московский энергетический институт, Москва, Россия

*E-mail: vortex@iht.mpei.ac.ru

Поступила в редакцию 03.10.2022 г.

После доработки 24.11.2022 г.

Принята к публикации 06.12.2022 г.

Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований процессов, сопутствующих плавке металлических образцов, нагреваемых на воздухе с помощью индуцируемых токов. В качестве материала экспериментальных моделей — шаров и цилиндров с характерным размером 10 мм — использовались чистое железо, цветные металлы, а также стали различных марок. Изучен необычный физический эффект, наблюдаемый в экспериментах с железом и сталями и связанный с интенсивным выбросом из образцов искр — мелких ярко светящихся металлических капель. Предложен возможный термомеханический механизм эмиссии капель, основанный на возникновении при плавлении металла избыточного давления расплава внутри объема образца, ограниченного образовавшейся твердой оболочкой, состоящей из окислов железа. Проведены численные расчеты, результаты которых в целом подтверждают выдвинутую гипотезу.

DOI: 10.31857/S0040364423020047

ВВЕДЕНИЕ

В атомной энергетике потребность в изучении процессов плавления и горения различных металлов связана, в частности, с необходимостью создания более достоверных моделей протекания аварийных процессов при разрушении твэлов [1] и при паровых взрывах [2–4]. Для экспериментального изучения данных явлений удобно использовать индукционные нагреватели. Их применение позволяет упростить конструкции установок и методику проведения экспериментов [5–7]. Кроме того, индукционный способ нагрева позволяет осуществлять чистую левитационную [8] и бестигельную плавку металлов [9], а также относительно просто заменить небезопасные эксперименты с ядерным топливом в конструкционно сложных устройствах физическим моделированием теплообменных процессов с внутренними источниками тепловыделения посредством использования наведенных вихревых токов.

При экспериментальном изучении вышеупомянутых явлений, связанных, в частности, с анализом возможных механизмов фрагментации жидкометаллических капель при паровых взрывах, наблюдался любопытный физический эффект.

Он заключался в интенсивной эмиссии мелких ярко светящихся капель из расплавленного образца в окружающее воздушное пространство [10]. Проведенный анализ литературы не выявил публикаций, посвященных описанию механизмов подобного явления. Ниже представлены результаты дополнительных экспериментальных исследований по данной проблеме и их возможное теоретическое истолкование.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Эксперименты были выполнены на установке (рис. 1), содержащей индуктор мощностью 4.5 кВт. Исследуемые образцы, которые представляли собой металлические шары или цилиндры с характерным размером 10 мм, размещались на керамической подставке в центре кольцевого одновиткового индуктора. Характерная частота тока индуктора составляла 60 кГц. Температура поверхности образца измерялась методом спектральной пирометрии с помощью спектрометра типа AvaSpec-3648, максимальное значение температуры достигало 2500 К. Видеозаписи процессов плавления и горения осуществлялись посредством трех видеокамер со скоростью съемки 50, 250 и 960 кадр/с. При видеосъемке использовались светофильтры и отражающие стекла. Это позволило наблюдать интен-

¹ По материалам Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8). Москва. 17–22 октября 2022 г.

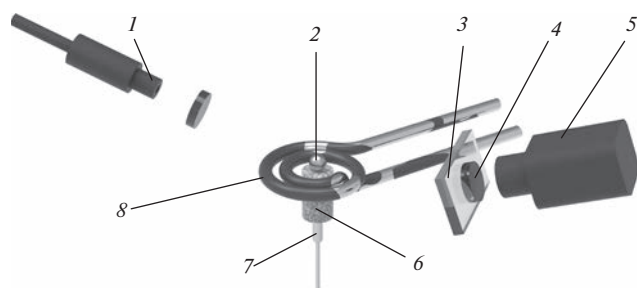


Рис. 1. Упрощенная схема экспериментальной установки: 1 – спектрометр, 2 – металлический образец в виде шара, 3 – отражающее стекло, 4 – светофильтр, 5 – видеокамера, 6 – керамическая подставка, 7 – термопара, 8 – кольцевой индуктор.

сивное вихревое движение на боковой поверхности расплавленной капли. В качестве материалов образцов использовались стали различных марок, включая шарикоподшипниковые типа ШХ15 и 95Х18Ш, а также чистые металлы: железо, медь, свинец, никель. Эксперименты проводились в воздушной среде.

В соответствии с известной методикой [11] температура нагреваемого образца определялась по углу наклона линейного участка спектра, представленного в координатах Вина $Y = \ln(I\lambda^5)$, $X = C_2/\lambda$. Здесь I – интенсивность излучения, Вт/(см² мкм); λ – длина волны, мкм; константа $C_2 = 14388$ мкм К. Типичный вид полученных результатов показан на рис. 2. Представленные графики свидетельствуют о работоспособности данной методики во всем исследованном температурном диапазоне от 1000 до 2500 К. Достоверность полученных данных подтверждается вполне удовлетворительным соответствием результатам измерений температуры (до 1300 К) с помощью хромель-алюмелевой термопары, размещенной внутри образца – шара.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты видеосъемки свидетельствуют об отсутствии влияния формы образца (цилиндрическая или шаровая) на исследуемые эффекты. Однако наблюдается значительная разница в характере протекания плавления и интенсивного испарения (потери массы) для образцов из различных металлов. В отличие от чистых металлов (олово, свинец, медь, никель) и нержавеющей стали марки Х18Н10Т, плавление технического железа (АРМКО), шарикоподшипниковых (ШХ15, 95Х18) и углеродистых сталей (Ст 45, Ст 3) сопровождается интенсивной эмиссией ярко светящихся мелких брызг диаметром 0.1–1 мм (рис. 3). Особенно наглядно подобный эффект проявляется при плавлении образцов, изготовленных из стали ШХ15 (рис. 3, 4).

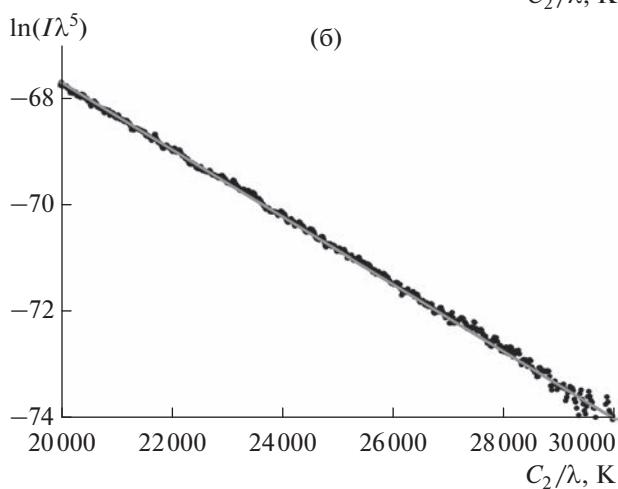
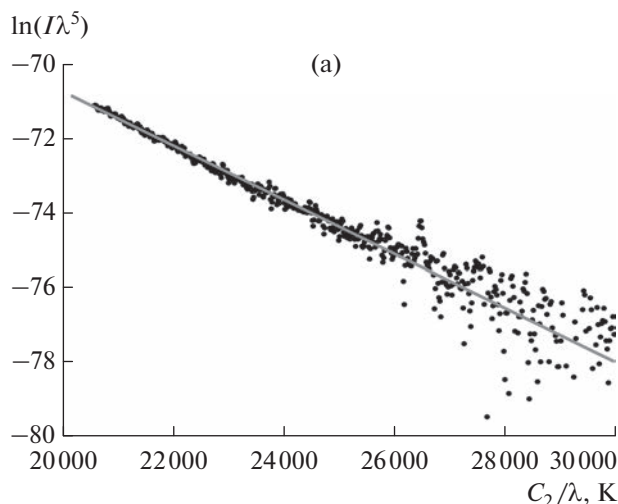


Рис. 2. Характерный спектр излучения высокотемпературных образцов в координатах Вина: (а) – медь, $T = 1436$ К; (б) – сталь ШХ15, 1667 К.

Начальная скорость вылетающих мелких капель по данным видеосъемки лежит в диапазоне 0.5–3.5 м/с (рис. 4). Эти капли в процессе разлета уменьшаются в размерах от 0.1–1.1 мм (рис. 4в) до 0.01–0.4 мм (рис. 5) за счет испарения и дробления.

Анализ видеоматериала (рис. 3в) свидетельствует, что дробление вылетевших в окружающую среду вторичных капель может возникать: 1) спонтанно, без видимых источников внешнего воздействия; 2) при столкновении частиц друг с другом; 3) вследствие внешнего ударного воздействия, связанного с взрывной фрагментацией соседних вторичных капель. Следует заметить, что механизм дробления вторичных капель зависит от того, в каком из двух (твердом или жидком) состояний в момент взаимодействия они находятся. Оценочные значения температуры вторичных капель, определенные на основе спектральных измерений, близки к значению температуры плавления стали ($\sim 1450^\circ\text{C}$).



Рис. 3. Фотографии эмиссии жидкометаллических капель из стали ШХ15: (а) — $T = 1900$ К, скорость съемки — 250 кадр/с; (б) — >2000 К, 250 кадр/с; (в) — 1900 К, 960 кадр/с.

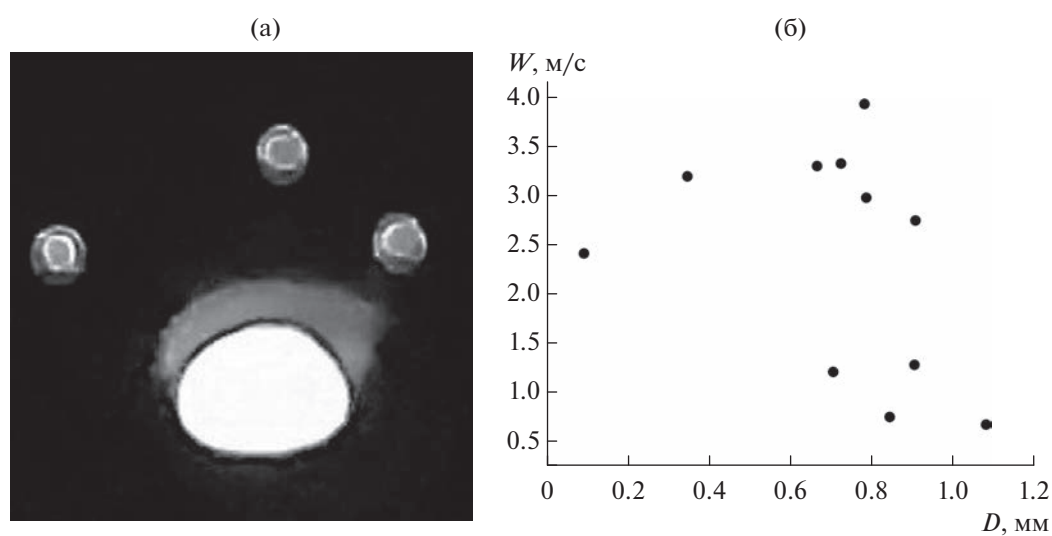


Рис. 4. Фотография вылета вторичных капель из расплавленного исследуемого образца (а) и зависимость начальной скорости вылета вторичных капель от их диаметра (б).

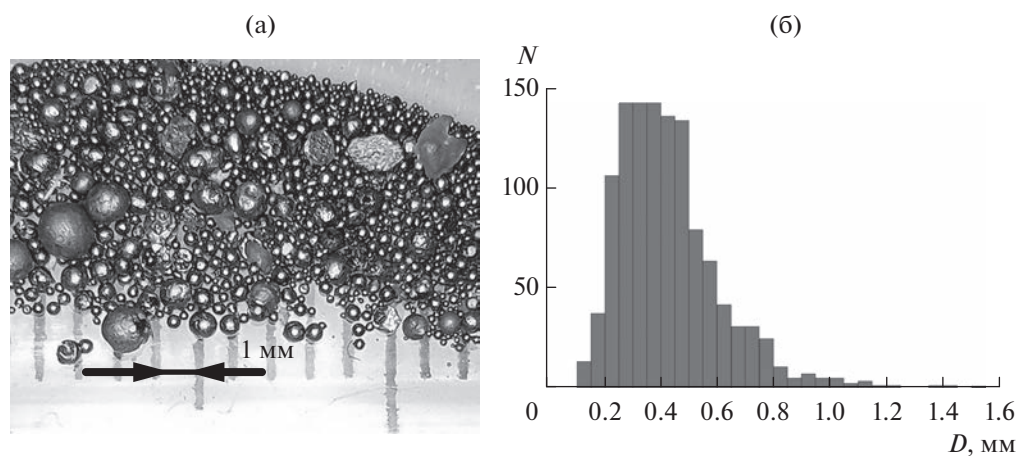


Рис. 5. Фотография затвердевших вторичных капель (а) и их распределение по диаметру (б); N — количество частиц данного диаметра.

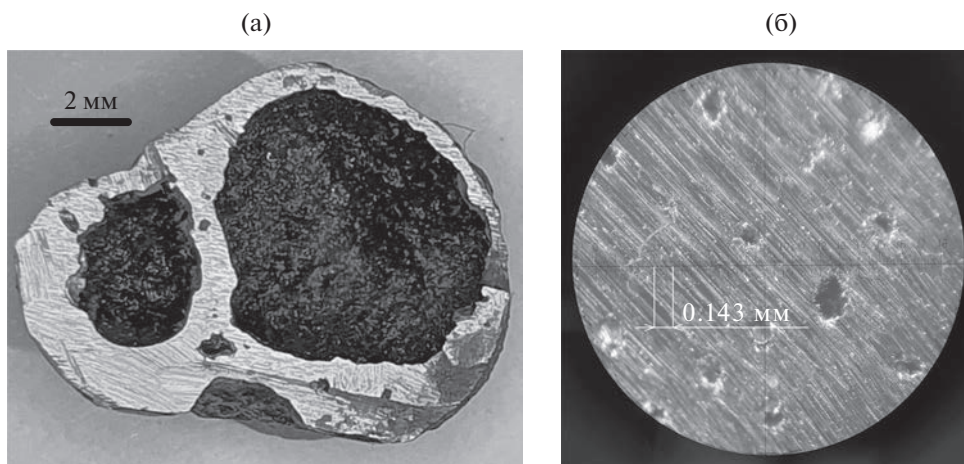


Рис. 6. Фотографии вертикального осевого (а) и горизонтального приповерхностного (б) срезов остывшей капли.

Выброс мелких вторичных капель расплава, вызывающий интенсивное уменьшение массы большей материнской капли, наблюдался по всей ее поверхности. В конечном итоге в большинстве случаев капли из расплава стали ШХ15 при затвердевании превращались в пустотелый предмет — раковину из оксидов железа (рис. 6а), которая была пронизана множеством сквозных отверстий.

Результаты рентгеноструктурного анализа металлических брызг и оболочки показали, что материал вторичных капель состоит из аморфной и кристаллической частей, в которой присутствуют следующие четыре фазы: Fe_3O_4 , FeO , $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и аустенит (твердый раствор на основе $\gamma\text{-Fe}$). Фаза Fe_3O_4 занимает 16%, FeO — 8%, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ — 5%, аустенит — 8% от общего объема. Остальная часть материала находится в аморфном состоянии. Материал оболочки также находится как в аморфном, так и в кристаллическом состояниях. В состав кристаллической части образца входят оксиды железа (Fe_3O_4 , Fe_2O_3) и феррит (твердый раствор на основе $\alpha\text{-Fe}$). По приблизительной оценке, на долю Fe_3O_4 приходится 17% объема, Fe_2O_3 — 5%, феррита — 7%.

Процесс плавления в индукторе независимо от типа материала образцов сопровождается относительно интенсивными механическими колебаниями объема расплава с сопутствующими волнами на его поверхности. Подобные эффекты могут быть обусловлены вихревыми течениями внутри капли, которые вызваны действием сил Архимеда и Ампера.

КАЧЕСТВЕННАЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ КАПЕЛЬНОЙ ЭМИССИИ

Полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что процесс плавления сталь-

ных образцов на воздухе, сопровождающийся интенсивной эмиссией капель, протекает в следующей последовательности. В начальный момент нагрева в среде, содержащей кислород, на поверхности образца происходит образование пористой оксидной пленки, состоящей главным образом из Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . Окислы исходного металла имеют более высокую температуру плавления по сравнению со сталью шарика (приблизительно на 100 К), обладают существенно более низкими значениями электропроводности, теплопроводности и термического расширения. Все это приводит к тому, что при дальнейшем нагреве происходит плавление образца внутри объема, ограниченного твердой оксидной оболочкой. Возникающее интенсивное движение расплава происходит под действием сил Ампера и Архимеда и состоит из множества вихрей. Взаимодействие между вихрями на стадии, когда твердая оксидная оболочка еще не сформировалась полностью, приводит к механическим колебаниям всей капли и образованию волн на ее поверхности. Вихревое перемешивание расплава способствует выравниванию его температуры, а последующий нагрев вызывает дальнейшее увеличение давления на оксидную оболочку и рост в ней термомеханических напряжений. Термомеханические напряжения в тонкой оболочке приводят к образованию дефектов (трещин, каналов) разного размера. Через дефекты струйки расплава выбрасываются в окружающее пространство, причем из-за действия поверхностного натяжения струйки распадаются на мелкие фрагменты, которые принимают форму шариков (рис. 7). На рис. 7 P , $P_{\text{атм}}$ — давление соответственно внутри капли и в окружающей среде.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ОЦЕНОК

Для подтверждения приведенных выше качественных соображений с использованием метода

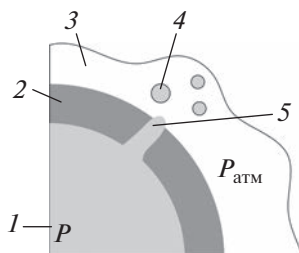


Рис. 7. Предполагаемая схема вылета и разлета расплава: 1 — расплав, 2 — оксидная оболочка, 3 — атмосфера, 4 — капля, 5 — трещина (дефект) в оболочке.

конечных элементов были выполнены оценочные численные расчеты распределения температуры, скорости, давления и механических напряжений в металлическом шаре в условиях, близких к экспериментальным.

Расчетная область состояла из двух подобластей. Первой подобластью являлся внутренний шар, представляющий собой твердое тело (металл) на первом этапе расчета и жидкость — на втором. Второй подобластью выступал сферический слой твердого неплавкого оксида, окружающий внутренний шар (рис. 8). Толщина оксида — переменная величина, которая определяется в соответствии с законами окисления в различных интервалах температур [12]:

1) низкотемпературное окисление ($<400^\circ\text{C}$) — логарифмический закон $h = k \ln(t)$;

2) окисление при средних температурах ($500\text{--}1000^\circ\text{C}$) — параболический закон $h^2 = kt$;

3) высокотемпературное окисление ($>1000^\circ\text{C}$) — линейный закон роста $h = kt$.

Здесь k — константа реакции для соответствующего закона окисления, t — время протекания реакции. Характерная скорость роста толщины оксидного слоя при температуре образца выше 1000°C составляет ~ 1 мкм/с.

На первом этапе посредством нестационарного уравнения теплопроводности решалась сопряженная задача переноса тепла в твердом металлическом шаре и оксидном слое. Теплофизические свойства сплава в твердожидком состоянии рассчитаны с помощью термодинамической базы данных CompuTherm, входящей в состав системы ProCAST². Эта база данных позволяет определить по химическому составу сплава теплофизические свойства, необходимые для моделирования процессов плавления и затвердевания. В ней плотность, теплопроводность, доля твердой фазы, энтальпия, вязкость представлены в виде табличных значений в нелинейной зависимости от температуры сплава. Характерные значения некоторых

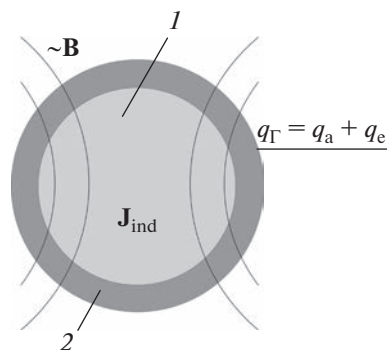


Рис. 8. Схема расчетной модели: 1 — внутренняя область металла (твердая или жидкая), 2 — оксидная оболочка.

свойств, используемые в расчетах по плавлению стали ШХ15, представлены в таблице.

Свойства (плотность, теплопроводность, электропроводность, коэффициент теплового расширения) считались зависящими от температуры, а значения относительной магнитной проницаемости и теплоемкости стали принимались постоянными ($\mu_{\text{ШХ15}} \cong 750$ и $c_p = 0.505$ кДж/кг К) во всем температурном диапазоне исследований.

Нестационарное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + q_v, \quad q_v = \frac{|\mathbf{J}|^2}{\gamma}.$$

Здесь q_v — мощность внутреннего тепловыделения из-за индукционного нагрева, $\mathbf{J}$ — плотность тока, γ — электропроводность.

На поверхности исследуемого образца имеет место активная теплоотдача в окружающую среду, тепло уносится конвекцией (q_a) и излучением (q_e), таким образом можно задать граничное условие на границе:

$$q_r = q_a + q_e = \alpha(T)(T_{\text{ext}} - T_r) + \varepsilon \sigma (T_{\text{ext}}^4 - T_r^4), \quad (2)$$

где T_{ext} — температура окружающей среды, T_r — температура на границе, α — коэффициент теплоотдачи, ε — степень черноты, σ — постоянная Больцмана.

Из-за низкой теплопроводности оксида максимальная температура образца в объеме может на десятки градусов превышать температуру поверхности. Это подтверждает возможность плавления стали внутри твердой оксидной оболочки.

На втором этапе полагается, что произошло плавление и шар заполнен жидким металлом. Для получения необходимых полей скорости $\mathbf{u}$ и давления p совместно решаются:

уравнение неразрывности

² ProCAST, торговая марка ESI Group, France, www.esi-group.com

Теплофизические свойства стали марки ШХ15, используемые в расчетах

$T, ^\circ\text{C}$	Коэффициент теплового расширения $\alpha \times 10^6, 1/\text{K}$	Удельное электросопротивление $\rho_{\text{эл}} \times 10^9, \text{Ом}$	Динамическая вязкость $\mu \times 10^3, \text{Па с}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \text{Вт}/(\text{м К})$	Плотность $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Удельная теплоемкость $c_p, \text{кДж}/(\text{кг К})$
200	15.1	390		45.020	7729.6	0.48–0.53
500	15.5	470		40.342	7691.0	
1500	~100	~500	4.65	32.191	6842.7	

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0,$$

уравнение Навье–Стокса

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + (\mu/\rho) \Delta \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mathbf{F}}{\rho}$$

и уравнение энергии

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla(\lambda \nabla T) + q_v.$$

Одновременно решалась задача о нахождении распределения термических напряжений в слое оксида.

Электромагнитная сила (сила Ампера) создается в результате взаимодействия суммарного тока $\mathbf{J}$ (наводимого индуктором и вызванного движением жидкости) с собственным полем этого тока $\mathbf{B}$:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad \mathbf{J} = \mathbf{J}_{\text{ind}} + \gamma \mathbf{u} \times \mathbf{B}.$$

Результаты моделирования свидетельствуют о возникновении двух тороидальных вихрей в полости (рис. 9).

Полученная информация о распределении давления и времени начала плавления стального образца позволяет оценить корректность рабочей

модели путем сопоставления данных моделирования и видеосъемки. Результаты расчетов согласуются с описанной выше схемой протекания процесса, а их справедливость подтверждается вполне удовлетворительным соответствием экспериментальных и расчетных значений времени нагрева образцов до температуры плавления.

Одной из основных целей моделирования являлось получение информации о напряжениях, возникающих в толще окисной пленки. На рис. 10 приведен расчетный график зависимости максимального термического напряжения в окисидном слое от времени.

Из полученного графика зависимости для стали ШХ15 видно, что ввиду механической нагрузки примерно на седьмой секунде напряжение достигает критической величины ($\tau_{\text{кр}}$ – среднее критическое напряжение деформации для FeO равно 28 МПа [13]), после чего должна начаться деформация поверхности. В эксперименте разлет капля происходит примерно на 11-й секунде. Это небольшое разногласие можно отчасти объяснить тем обстоятельством, что при окислении, помимо структуры FeO, образуются дополнительно Fe₂O₃ и Fe₃O₄, критические значения напряжений кото-

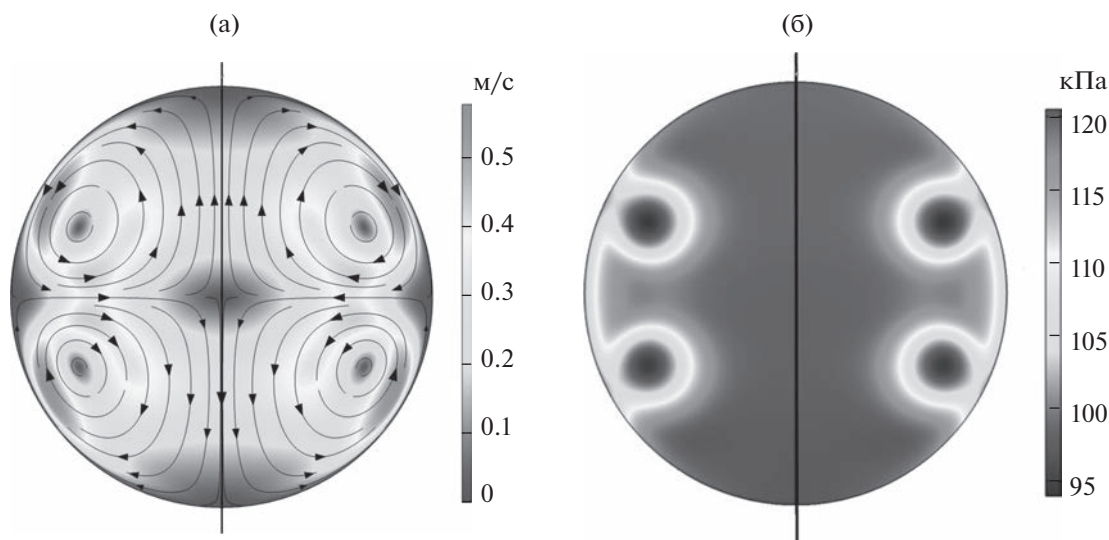


Рис. 9. Типичный вид мгновенных полей скорости (а) и давления (б).

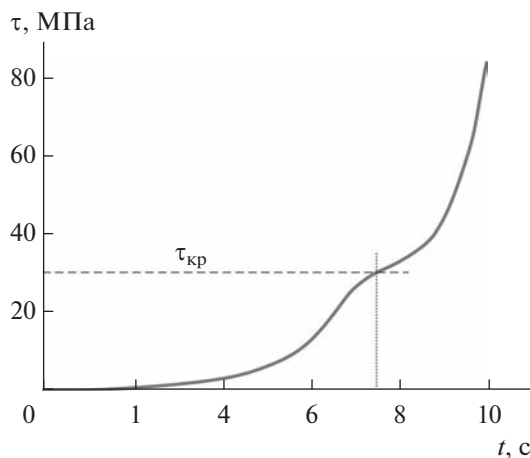


Рис. 10. График зависимости максимального напряжения в слое окисла от времени при нагреве образца из ШХ15.

рых больше соответствующих значений для FeO. Кроме того, в расчетах не учитывается время, необходимое для полного расплавления металла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены и проанализированы экспериментальные данные по исследованию физического эффекта, связанного с интенсивной эмиссией капель с жидкометаллической поверхности при плавлении стальных шариков в кольцевом индукторе. Рассмотрен возможный механизм наблюдаемого явления, основанный на увеличении давления в объеме расплава, ограниченного твердой оксидной коркой. Проведены численные расчеты, результаты которых в целом подтверждают высказанное предположение. Вопрос об отсутствии обсуждаемого эффекта для нержавеющей стали типа X18H10T, который, возможно, обусловлен отличительными магнитными и коррозионными свойствами подобных материалов, требует дальнейшего более пристального изучения.

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения численных кодов протекания техногенных аварий на АЭС [1] и представляют интерес для разработчиков перспективного бесстигельного способа плавления титана [9]. Разработанная модель, а также экспериментальные данные по интенсивной эмиссии и вторичной фрагментации горячих частиц можно использовать для лабораторного моделирования различных процессов, включая разрушение метеоритов и извержение вулканов на экзопланетах [14].

Авторы выражают благодарность В.П. Монастырскому за предоставление расчетных данных по теплофизическим свойствам стали марки ШХ15 и полезное обсуждение результатов проведенных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов О.В., Назаров Д.А., Синицын Д.С., Мосунова Н.А., Сорокин А.А. Описание моделей горения натрия в помещениях АЭС с РУ БН интегрального кода ЕВКЛИД/V2 и результаты их валидации // Теплоэнергетика. 2022. № 7. С. 38.
2. Fletcher D.F., Theofanous T.G. Heat Transfer and Fluid Dynamic Aspects of Explosive Melt–Water Interactions // Adv. Heat Transfer. 1997. V. 29. P. 129.
3. Степанов Е.В. Физические аспекты явления парового взрыва. Препринт № 54503/3. М.: ИАЭ, 1991.
4. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов. М.: Изд-во ИПМех РАН, 2020. 276 с.
5. Деревяга М.Е., Стесик Л.Н., Федорин Э.А. Исследование процесса воспламенения образцов титана в кислороде // ФГВ. 1976. № 4. С. 544.
6. Деревяга М.Е., Стесик Л.Н. Влияние давления на скорость горения и окисления молибдена // ФГВ. 1981. № 2. С. 64.
7. Zyszkowski W. Study of the Thermal Explosion Phenomenon in Molten Copper–Water System // Int. J. Heat Mass Transfer. 1976. V. 19. P. 849.
8. Herlach D.M., Galenko P., Holland-Moritz D. Metastable Solids from Undercooled Melts. Pergamon Materials Series. Elsevier, 2007. V. 10. 432 p.
9. Khatsayuk M., Demidovich V., Timofeev V. The Destruction Model of Cylindrical Billet's Hard Shell During Heating and Melting by Internal Sources // Proc. UIE 2021 XIX Int. UIE Congress on Evolution and New Trends in Electrothermal Processes. Czech Republic, 2021. P. 73.
10. Vinogradov D.A., Ivochkin Yu.P., Kubrikov K.G., Sinkovich O.A., Teplyakov I.O. Study of the Features of Behavior of Overheated Liquid-metal Drops in Gas Media, Water, and Electromagnetic Field of the Inductor // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1359. 012037.
11. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия объектов с неоднородной температурой // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 7. С. 78.
12. Шлугер М.А., Ажогин Ф.Ф., Ефимов Е.А. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1981. 216 с.
13. Физико-химические свойства окислов. Спр. / Под ред. Самсонова Г.В. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
14. Kislyakova K.G., Noack L., Johnstone C.P., Zaitsev V.V., Fossati L., Khodachenko M.L., Odert P., Güdel M. Magma Oceans and Enhanced Volcanism on Trappist-1 Planets Due to Induction Heating // Nat. Astron. 2017. V. 1. P. 878.