

С. Л. Тимченко

**ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА
В ФОРМЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЫ**

Экспериментально исследовано магнитоэлектроимпульсное заполнение литейной формы жидким металлом с использованием переменной во времени электромагнитной силы Ампера. Показан способ косвенного измерения коэффициента сопротивления жидкого металла и определено среднее числовое значение коэффициента сопротивления металла при его движении в форме. Способ позволяет исследовать совместное влияние параметров формы и металла на параметры процесса заполнения металлом формы. В результате анализа рельефа свободной поверхности металла выявлено результирующее действие электромагнитных сил.

E-mail: svtimchenko@yandex.ru

Ключевые слова: электромагнитные силы, коэффициент сопротивления, жидкий металл, кристаллизация.

В настоящее время изучение влияния электрического тока, магнитного и электромагнитного полей на процесс кристаллизации и физические свойства материала отливок имеет практическую ценность. Магнитные и электромагнитные поля используются для перемешивания, модифицирования расплава в тигле или форме, для разогрева металла в прибылях. Указанными полями обрабатывают расплав перед заливкой его в форму. Электрический ток влияет на интенсивность массопереноса, газосодержание металлов, растворимость примесных компонентов. Управление процессом кристаллизации с использованием электромагнитного воздействия позволяет получить однородную мелкозернистую структуру отливок [1–4].

При изучении влияния электрического тока плотностью $j = (3,3 \dots 10,6) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ на кинетику растворения меди, титана и железа в алюминиевых сплавах зафиксировано, что обработка расплавов электрическим током во много раз повышает скорость растворения металлических примесей и других компонентов в расплаве, являющихся центрами кристаллизации. Это не только обеспечивает мелкозернистую структуру, но и повышает однородность материала отливки [2, 3]. Под воздействием электрического тока растворяются стреловидные включения кремния, что повышает качество расплава. Прочность увеличивается на 25...30%, а относительное удлинение в 7–8 раз [1–3]. Твердость материала отливок, кристаллизация которых осуществлялась под действием электрического тока, повышается на ~15% при плотности тока через образец $j = 10^6 \dots 10^7 \text{ А/м}^2$ [4].

Несмотря на положительное влияние внешних воздействий в виде электрического, магнитного или электромагнитного полей на физические свойства материала изделия, их применение связано с определенными техническими трудностями. Использование указанных воздействий в реальном технологическом процессе требует их детальной проработки. Например, для использования электрического и магнитного полей в качестве движущей силы процессов модифицирования, кристаллизации, а также для применения указанных воздействий при заполнении формы металлом недостает информации, позволяющей создать реальную физическую модель явлений — результатов данных воздействий. В частности, использование электромагнитного воздействия в качестве внешней силы, движущей металл в форму, предполагает учет сил сопротивления. Коэффициент сопротивления жидкого металла на порядок превосходит коэффициент сопротивления жидкости и существенно зависит от свойств контактирующей поверхности. Поэтому при движении жидкого металла в форме сложно обеспечить однородность свойств по всему объему образца, а следовательно, качественно заполнить форму. В случае использования малых объемов металла, если требуется заполнение каналов, возникает необходимость не только регулирования температурного режима, но и учета сил поверхностного натяжения в условиях, когда время внешнего воздействия на материал лимитировано временем существования жидкой фазы.

Цель настоящей работы — экспериментальное изучение магнито-электроимпульсного заполнения литейной формы жидким металлом с использованием переменной во времени электромагнитной силы Ампера и определение коэффициента сопротивления жидкого металла. Скорость заполнения формы регулировалась значениями параметров импульсного электрического и магнитного полей. Использование динамической силы Ампера в качестве движущей позволяет заполнить литейную форму в тех случаях, когда капиллярные силы являются недостаточными или вообще отсутствуют. Данное воздействие является актуальным при использовании малых объемов жидкого металла, когда требуется быстрое заполнение формы, вызванное ограничением во времени фазового перехода за счет роста скорости охлаждения.

В качестве материала образца использовали легкоплавкий сплав Вуда (химический состав, %: Bi 50,1; Pb 24,9; Sn 14,6; Cd 10,8) с температурой плавления $T_{пл} = 338,5$ К. Эксперимент проводился в условиях, когда гравитационные силы $F_{гр}$ препятствуют заполнению литейной формы (рис. 1).

На рис. 2 представлена схема сил молекулярного взаимодействия металла с поверхностями материала формы $F_{мф}$ и электродов $F_{мэ}$,

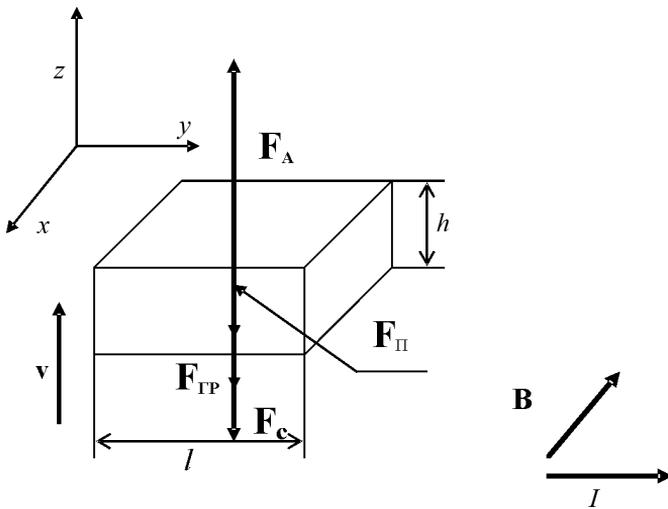


Рис. 1. Схема сил, действующих на образец

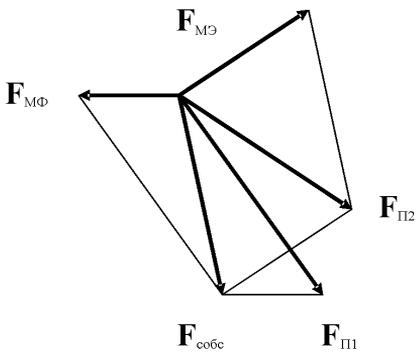


Рис. 2. Схема сил поверхностного натяжения

а также указана сила собственно-го межмолекулярного взаимодействия $F_{\text{собс}}$. Поверхность материала формы и электродов была не смачиваемой для жидкого металла. Таким образом, результирующая сила поверхностного натяжения $F_{\text{п}} = F_{\text{п1}} + F_{\text{п2}}$ противоположно направлена движущей силе Ампера F_A и скорости движения металла v . В этом случае движение металла в форму реализуется при условии

$$F_A \geq F_{\text{гр}} + F_c + F_{\text{п}}. \quad (1)$$

Рассматривая движение однородного по своим свойствам объема металла в однородном магнитном поле B для случая $F_c = -r \cdot v$, получаем

$$v = \frac{(IBl - \gamma Vg - 2\sigma(l + h))}{r} \left(1 - e^{-\frac{r}{\gamma V}t}\right). \quad (2)$$

Здесь γ – плотность материала; r – коэффициент сопротивления; σ – коэффициент поверхностного натяжения; V – объем.

Обеспечивая условие баланса сил, можно добиться скорости движения рассматриваемого объема, равной

$$v_{\text{max}} = \frac{(IBl - \gamma Vg - 2\sigma(l + h))}{r}. \quad (3)$$

На рис. 3 представлены схемы экспериментальной установки. Для обеспечения движения жидкого металла в форму применялись источник импульсного электрического тока и электромагнит, имеющий магнитопровод диаметром 10 см, для создания внешнего магнитного поля.

На рис. 3, *а* показано взаимное расположение емкости с жидким металлом 1, формы с электродами 2, электромагнитами 4, блок электропитания 5 обмоток электромагнита. Форма 2 расположена по центру промежутка между электромагнитами 4. Температура расплава контролировалась термопарой 3. Предварительно устанавливалась за-

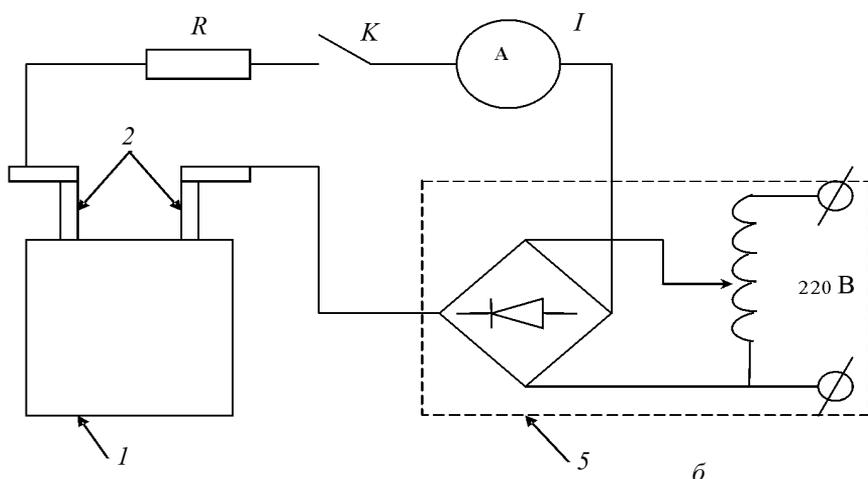
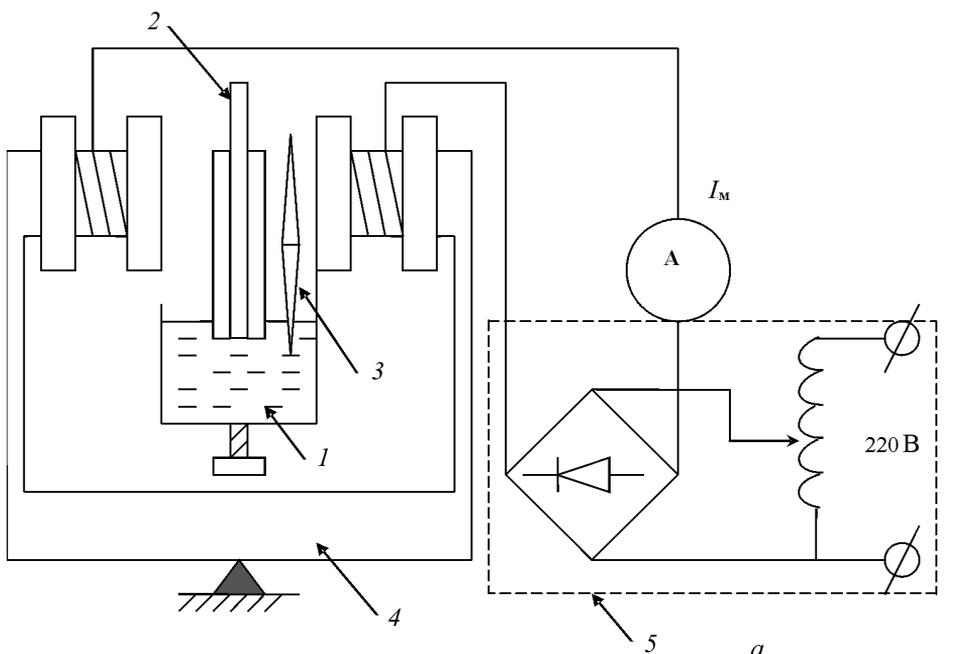


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для создания магнитного поля (*а*) и электрического тока через расплав (*б*)

висимость индукции магнитного поля B от силы тока I_M в катушках электромагнита. Значение B в зазоре катушек электромагнита было измерено с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8. Так как площадь поверхности магнитопровода превышает площадь поверхности образца примерно в 300 раз, а расстояние между полюсами магнитопровода не превышает их диаметра, то в области фиксирования формы создается однородное магнитное поле.

На рис. 3, б приведена часть схемы экспериментальной установки, с помощью которой было обеспечено протекание электрического тока через образец. Для реализации импульсного режима протекания электрического тока через металл были использованы алюминиевые электроды диаметром 2,5 мм, которые располагались по высоте формы. Прямоугольная форма размером $3 \times 6,5$ мм произвольной высоты изготовлена из текстолита.

Следует отметить, что форма была нужна лишь для экспериментального моделирования процесса магнитоэлектроимпульсного заполнения. Движение металла в расплавленном состоянии под действием силы Ампера будет происходить и при свободных боковых поверхностях. Длительность импульса тока через расплав согласовывалась с временем фазового перехода материала.

Емкость с жидким металлом l приводилась в контакт с краем формы и электродами. Устанавливалось требуемое магнитное поле по току I_M , пропускаемому через катушки индуктивности. Затем включали ключ K и давали выдержку по времени для заполнения расплавом формы и его затвердевания. Форма электрического сигнала, подаваемого на катушки электромагнита и расплав, задавалась с помощью элементов 5.

Используя уравнение теплового баланса для рассматриваемого объема металла, находящегося в условиях конвективного теплообмена с окружающей средой, $\lambda dm + j^2 \rho dV dt = k S_{\text{бок}}(T - T_0)dt$, можно определить время фазового перехода

$$dt = \frac{\lambda \gamma dV}{k(T - T_0)S_{\text{бок}} - j^2 \rho dV},$$

где λ и ρ — удельная теплота и электросопротивление; k — коэффициент теплоотдачи.

Время заполнения формы должно быть меньше времени фазового перехода: $\tau \leq dt$. В эксперименте время затвердевания составляло $\sim 1,5$ с. Таким образом, необходимо согласовывать параметры внешнего воздействия с теплофизическими свойствами образца, окружающей среды и формы. В данном случае время заполнения формы можно регулировать изменением параметров внешнего воздействия (I, B),

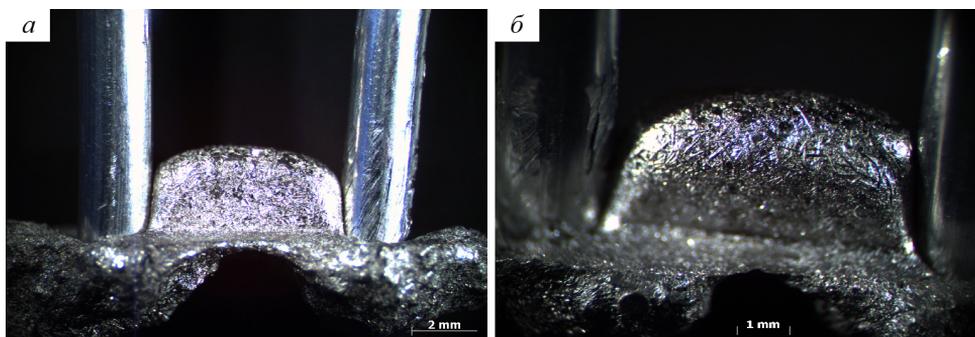


Рис. 4. Общий вид образца

а время фазового перехода — условиями теплообмена. Для больших объемов металла распределение температуры внутри тела с учетом теплообмена с формой можно найти, решая уравнение теплопроводности [5].

Результаты эксперимента и их обсуждение. При индукции внешнего магнитного поля $B = 0,4$ Тл и силе тока в импульсе $I = 9$ А был получен образец размером $3,0 \times 6,1 \times 4$ мм (рис. 4). Высота металла, втянутого вверх против действия гравитационных сил в форму, составила 4 мм. Согласно оценкам, масса втянутого жидкого металла плотностью $9,72 \cdot 10^3$ кг/м³ составляет 0,711 г. Давление импульсной электромагнитной силы на втянутый объем равно $1,2 \cdot 10^3$ Па. Важно отметить, что гидростатическое давление столба жидкого металла указанной высоты соответствует давлению 381 Па. Избыточное электромагнитное давление, втягивающее жидкий металл в форму, в 3 раза превышает гидростатическое давление столба жидкого металла. Так как тормозящее действие на движение жидкого металла наряду с гравитационными силами оказывают силы вязкого трения и поверхностного натяжения (угол смачивания $< \pi/2$), указанное превышение электромагнитного давления будет меньшим.

На рис. 4, б видно, что свободная поверхность образца содержит макрокристаллы, ориентированные преимущественно от катода к аноду. Это можно объяснить действием боковой силы, объемная плотность которой с учетом поступательного движения объема определяется соотношением

$$f_y = enE + env \times B,$$

а ее отношение к объемной плотности вертикальной, движущей силы f_z

$$f_y/f_z = \frac{E}{\langle v \rangle B} + \frac{v}{\langle v \rangle}.$$

Здесь v — скорость поступательного движения объема; $\langle v \rangle$ — скорость дрейфа носителей; E — напряженность электрического поля.

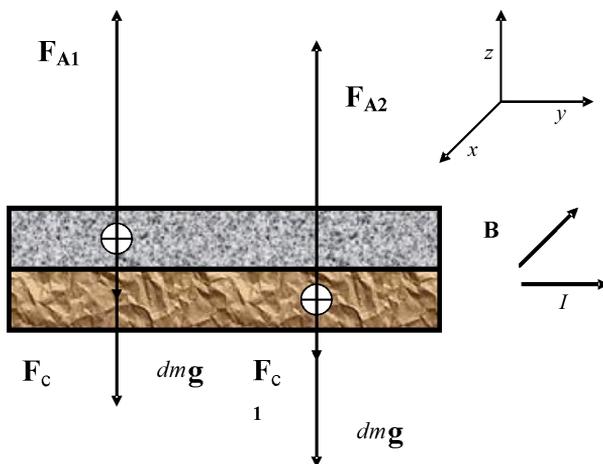


Рис. 5. Схема движения слоев жидкого металла

При движении жидкого металла в форму происходит его охлаждение. Учитывая температурную зависимость удельной электропроводности $\sigma(T)$, получаем разность в ускорении движения слоев (рис. 5)

$$a_1 - a_2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\gamma} EB,$$

где σ_1, σ_2 — удельная электропроводность слоев с меньшей и большей температурами соответственно; E — напряженность электрического поля в проводнике.

Следовательно, между слоями возникает дополнительное силовое воздействие, связанное с их неравномерным охлаждением. Например, для висмута отношение удельных электропроводностей материала в твердом и жидком состояниях σ_S/σ_L составляет 0,43. В этом случае ускорение нижних слоев, как слоев с большей температурой, будет бóльшим и они будут подпирать верхние слои, т.е. оказывать на них давление. У большинства металлов $\sigma_S > \sigma_L$, поэтому верхние слои будут иметь большее ускорение. Например, у алюминия (Al), входящего в состав многих литейных сплавов, $\sigma_S/\sigma_L = 1,64$. Неравномерность силы Ампера по высоте столба металла приведет к неоднородности плотности образца. Поэтому на практике реализация движения металла сверху вниз под действием внешних сил при исключении свободной поверхности позволит создать более качественную внутреннюю структуру материала.

В данном способе воздействия не исключается возможность разогрева металла в жидком состоянии электрическим током. Без учета рассеяния энергии рассматриваемого объема за счет теплообмена плотность тока, необходимую для разогрева объема, можно определить как $j \geq \sqrt{\frac{L\gamma}{\rho\Delta t}}$. Расчет показывает, что для металлов $j \geq 10^7$ А/м².

Например, для висмута в жидком состоянии за время $\Delta t = 1 \text{ с}$ $j \geq 2 \times 10^7 \text{ А/м}^2$. В эксперименте плотность тока составляла $\sim 7,5 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$, поэтому существенного теплового влияния электрический ток не оказывал.

Ниже приведен расчет среднего значения коэффициента сопротивления металла. Учитывая, что на дозу металла, движимого за счет силы Ампера, действуют также силы тяжести, сопротивления, поверхностного натяжения (см. рис. 1), и полагая, что движение происходит в условиях локального равновесия $dA \leq 0$, применим энергетический подход.

Работа силы Ампера по абсолютному значению равна сумме работ сил, гравитационной, сопротивления и поверхностного натяжения:

$$A_{\text{амп}} = A_{\text{гр}} + A_{\text{с}} + A_{\text{п}} \quad (4)$$

Для расчета работ этих сил использованы известные формулы:

$$A_{\text{гр}} = \int_0^h \gamma Sgh dh = \frac{\gamma Sgh^2}{2} = \frac{mgh}{2};$$

$$A_{\text{амп}} = \int_0^h \sigma(h) EBSl dh,$$

$$\langle A_{\text{п}} \rangle = 2\langle \sigma \rangle l_{\text{п}} h.$$

Для использованной дозы металла получаем оценку работы гравитационной силы $\langle A_{\text{гр}} \rangle = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$, силы Ампера $\langle A_{\text{амп}} \rangle = 8,784 \times 10^{-5} \text{ Дж}$ и силы поверхностного натяжения $\langle A_{\text{п}} \rangle = 3,26 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$. Значение работы силы поверхностного натяжения рассчитано по среднему значению коэффициента поверхностного натяжения $\langle \sigma \rangle = 0,448 \text{ Н/м}$ составляющих расплав компонентов. Из соотношения (4) можно получить значение работы сил сопротивления при движении металла: $\langle A_{\text{с}} \rangle = \langle A_{\text{амп}} \rangle - \langle A_{\text{гр}} \rangle - \langle A_{\text{п}} \rangle = 4,13 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$. Это позволяет оценить силу сопротивления как $\langle F_{\text{с}} \rangle = \langle A_{\text{с}} \rangle / \langle h \rangle \approx 1,03 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$. Учитывая, что движение металла ламинарное, и задавая силу сопротивления в виде $F_{\text{с}} = rv$, получаем среднее значение коэффициента сопротивления

$$\langle r \rangle = \langle F_{\text{с}} \rangle / \langle v \rangle. \quad (5)$$

Согласно экспериментальным данным, время движения металла и его результирующее перемещение составляют $\tau \leq 1 \text{ с}$, $\langle h \rangle = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, скорость движения расплава $\langle v \rangle = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. Коэффициент сопротивления, рассчитанный по формулам (3) или (5) с учетом погрешности измерений, имеет значение $2,58 \pm 0,36 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$.

В настоящей работе электрический ток и магнитное поле были использованы совместно для осуществления одной из операций технологического процесса изготовления изделия, связанной с заполнением формы жидким металлом. Реализация движения металла в форму за счет действия на объем металла силы Ампера и измерение скорости движения объема при заданных силе тока I через движимый объем, индукции внешнего магнитного поля B и геометрии рассматриваемого объема делают возможным косвенное измерение коэффициента сопротивления металла в заданных условиях движения, что позволяет предварительно исследовать совместное влияние параметров формы и жидкого металла (химический состав, температура и др.) на параметры процесса заполнения металла формы с помощью традиционных способов литья. Для регулирования скорости заполнения формы и, следовательно, высоты втягиваемого слоя жидкого металла необходимо подбирать значения параметров внешнего воздействия — амплитуду и длительность импульса тока, индукцию внешнего магнитного поля. Магнитная сила Ампера создает не только внешнее давление, требуемое для заполнения формы, но и внутреннее, которое вызывает объемное сжатие слоев, что способствует ликвидации пор, обеспечивает сплошность материала отливки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о л ь ч у г и н а И. Ю., С е л я н и н И. Ф. Влияние внешних воздействий на микроструктуру кристаллизующегося расплава // Литейное производство. – 2009. – № 8. – С. 13–15.
2. К и л и н А. Б., Д о р о ф е е в А. В., П о к р о в с к а я Т. С. Электротоксовая обработка металлических расплавов // Сб. Научн. Тр. Уч. Орловской обл. – Вып. 5. В 2 т. Т. 1. – Орел: ГТУ, 1999. – 357 с.
3. Д о р о ф е е в А. В., К и л и н А. Б., Т е р т и ш н и к о в А. С. Обработка алюминиевых расплавов электротокком // Литейщик России. – 2002. – № 2. – С. 19–21.
4. Т и м ч е н к о С. Л., З а д о р о ж н ы й Н. А. Кристаллизация алюминиевого сплава под действием электрического тока // Литейное производство. – 2005. – № 9. – С. 12–13.
5. Б а л а н д и н Г. Ф. Теория формирования отливки. – М.: Изд.-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 360 с.

Статья поступила в редакцию 23.06.2010

Светлана Леонидовна Тимченко в 1989 г. окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана, в 1994 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 30 научных работ в области физики конденсированного состояния и электромагнитного воздействия на процессы кристаллизации металлов и сплавов.

S.L. Timchenko graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1989 and from the Lomonosov Moscow State University in 1994. Ph. D. (Phys.-Math.), assoc. professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 30 publications in the field of physics of condensed state and electromagnetic action on processes of crystallization of metals and alloys.