
ГИДРОДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 669.046:539.213

**Г. А. Сребрянский, И. В. Пыхтин, В. П. Сергиенко,
Н. М. Усов, В. В. Сокур, Е. Ю. Зуев, Д. И. Сакиев**

Никопольский техникум НМетАУ, Никополь

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ИСТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА ИЗ СОПЕЛ И НАСАДОК

В проведенной работе осуществлено моделирование условий истечения расплава из сопел разного поперечного сечения. Создана экспериментальная установка и отработаны методики определения гидродинамических характеристик струи жидкости, вытекающей из сопла в атмосферу с определенной скоростью. Методами видеосъемки установлены эффект стоячей волны в струе жидкости, падающей на твердую преграду, и исследованы условия его возникновения. Установлено нелинейное поведение коэффициента расхода при истечении жидкости из сопел разной конфигурации, отличное от классической гидродинамики. Выявлена и исследована необычная инверсия плоской струи жидкости, зависящая от скорости струи. Результаты моделирования позволяют рекомендовать разливку расплава в реальных условиях получения широкой ленты при малых зазорах «сопло-подложка». Кроме того, необходимо использовать увеличенное поперечное сечение сопла.

Ключевые слова: моделирование, разливка расплава, сопло, струя.

В проведенній роботі здійснено моделювання умов витікання розплаву із сопел різного поперечного перерізу. Створена експериментальна установка і відпрацьовані методики визначення гідродинамічних характеристик струменя рідини, що витікає із сопла в атмосферу із певною швидкістю. Методами відеозйомки встановлено ефект стоячої хвилі в струмені рідини, яка падає на тверду перешкоду, і досліджені умови його виникнення. Встановлена нелінійна поведінка коефіцієнта розходу при витіканні рідини із сопел різної конфігурації, відмінна від класичної гідродинаміки. Виявлена і досліджена незвичайна інверсія плоского струменя рідини, яка залежить від швидкості струменя. Результати моделювання дозволяють рекомендувати розливання розплаву в реальних умовах одержання широкої стрічки при малих зазорах «сопло-підложка». Крім того, необхідно використовувати збільшений поперечний переріз сопла.

Ключові слова: моделювання, розливання розплаву, сопло, струмінь.

This article studies conditions modeling of melt flow from the nozzles of different cross-section. An experimental setup has been built and methods for determining the hydrodynamic characteristics of the jet of liquid flowing from the nozzle into the atmosphere at a certain speed have been worked out. Effect of a standing wave in the liquid spray falling on to a solid barrier has been discovered by the filming method and the conditions of its origin have been investigated. The nonlinear behavior of the flow of the waste rate of the liquid from the nozzles of different configurations, which are different from classical hydrodynamics has been found. An unusual inversion of the flat liquid jets, depending on the speed of the jet were identified and investigated. The results of modelling melt

flow to recommend casting the melt in the real-world conditions for producing wide ribbon in small gaps «nozzle-substrate». Moreover, flow melt allow to use the enlarged cross section of the nozzle necessary.

Keywords: modelling, casting of melt, nggle, jet.

Введение

Развитие современных наукоёмких металлургических технологий – приоритетная задача металлургии Украины. Получение тонкого листа непосредственно из расплава методами непрерывной разливки является перспективной, современной, наукоёмкой и энергосберегающей металлургической технологией, ведущей своё начало от способа Генри Бесемера по разливке стали между двумя валками [1-5]. На сегодняшний день в проектах Eurostrip (Германия, Италия, Франция, Австрия), Castrip (США, Австралия, Япония) и фирм Nippon Steel и Mitsubishi Heavy Industries (Япония) получают из расплава лист толщиной 1-12 мм из разных сталей. Получение листа прокаткой расплава на двухвалковом модуле имеет следующие преимущества: исключение из технологической цепочки операций нагрева и горячей прокатки слябов, прокатки листа, снижение затрат на создание оборудования, значительное уменьшение вредных выбросов в атмосферу, экономия энергии и трудозатрат и ряд других [3, 4].

Однако, такая технология имеет и недостатки, обусловленные техническими трудностями подведения расплава в зазор между прокатными охлаждающими валками [3], выбором материала валков и отводом тепла из зоны кристаллизации, выбором материала боковых стенок-ограничителей и их конструкции, обеспечением постоянного уровня стали в ванне между валками с точностью ± 2 мм и предотвращением волнения поверхности ванны в валковом зазоре. Все это ухудшает качество поверхности получаемого листа. Фактически получают из расплава полуфабрикат (подкат) толщиной 1-12 мм для дальнейшей холодной прокатки в ленту толщиной 200 мкм и менее. Альтернативой является получение лент толщиной менее 0,1 мм при разливке калиброванного потока расплава на движущуюся с высокой скоростью (20-30 м/с) цилиндрическую теплопроводную поверхность, например, вращающийся барабан-кристаллизатор, минуя традиционные металлургические переделы (включая холодную прокатку) [6, 7]. При таком методе реализуются скорости охлаждения 10^5 - 10^7 К/с, что позволяет получить в лентах микрокристаллическую структуру с размером зерна 1-5 мкм и менее, а для ряда сплавов – твёрдое аморфное состояние. Его промышленные разновидности – «спинингование расплава» (CBMS) и «разливка плоского потока» (PFC)*.

В первом случае (CBMS) расплав подаётся на барабан-кристаллизатор через сопло-насадок круглого сечения, ширина получаемой ленты не более 5 мм. В методе PFC сопло-насадок щелевой формы, а ширина ленты до 200 мм и более. Общая схема этих процессов представлена на рис. 1.

Практическая ценность получения ленты закалкой расплава на барабане заключается не только в экономичности за счёт сокращения нескольких металлургических переделов. Получаемые за один цикл аморфные и микрокристал-

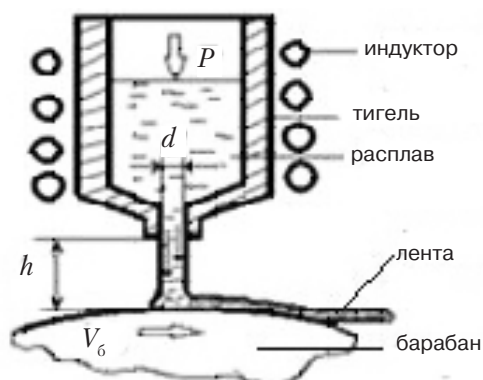


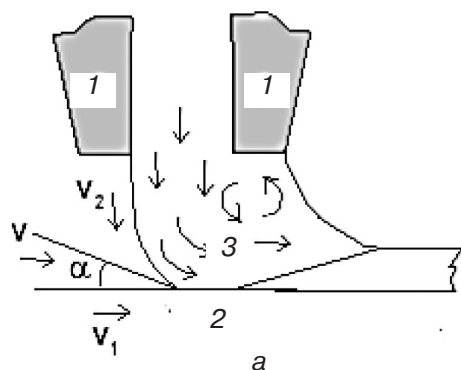
Рис. 1. Схема получения быстроохлажденных лент на поверхности барабана-кристаллизатора: P – давление на расплав внутри тигля; d – диаметр или ширина щели сопла; h – зазор «сопло-барабан»; V_0 – скорость барабана

*CBMS – Shill Block Melt Spinning; PFC – Planar Flow Casting.

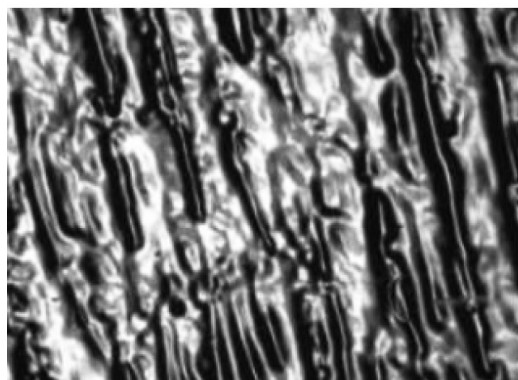
лические ленты толщиной 20-80 мкм имеют уникальное сочетание магнитных, механических, коррозионных и других свойств. Их применяют: в электротехнической и электронной промышленности, при пайке разных металлов и сплавов, в качестве материалов для износостойких покрытий, в бытовых электрообогревательных устройствах и прочее. Снижаются потери на перемагничивание и экономится электроэнергия (что актуально в плане энергосбережения), при пайке экономятся дорогие металлы (серебро, вольфрам, никель и др.), снижается температура пайки с сохранением высокой температуры эксплуатации паянных изделий. Однако, технология производства быстрозакалённых лент требует дальнейшего совершенствования, поскольку от геометрии и качества их поверхности зависит уровень получаемых свойств. Особенно это важно в производстве тороидальных магнитопроводов для трансформаторов и электрических дросселей, поскольку шероховатость ленты на 20-50 % снижает эксплуатационные характеристики изделия за счёт низкого коэффициента заполнения магнитопровода.

Анализ дефектов поверхности ленты

Основными дефектами аморфных лент сплавов на основе железа, никеля, кобальта и др., полученных в лабораторных и промышленных условиях, являются воздушные раковины (каверны) на контактной с барабаном поверхности ленты (рис. 2). Причины и механизм образования этих каверн описан в работах [8, 9]. В частности, взаимодействие расплава с пограничным потоком воздуха (рис. 2, а) приводит к отдельным кавернам (рис. 2, б) [9]. «Строчечные» дефекты (рис. 2, в) формируются вследствие чрезмерной (для данного процесса) шероховатости барабана, на которой можно при необходимости создать определённый микрорельеф [6]. Но есть дефект, природа которого до сих пор однозначно не определена. Он представляет собой периодическую волнообразную шероховатость на внешней и контактной поверхности ленты (рис. 3), которую в специальной литературе [10] называют «рыбья чешуя». При этом длина волны дефекта λ не совпадает с частотой индукционного нагревателя и



б



в

Рис. 2. Дефекты контактной поверхности аморфной ленты: а – механизм взаимодействия расплава с пограничным потоком воздуха (1 – сопло, 2 – барабан, 3 – расплав, V – скорость пограничного потока воздуха, V_1 – скорость барабана, V_2 – скорость истечения расплава); б – обусловленные взаимодействием с потоком воздуха; в – обусловленные шероховатостью барабана, $\times 100$

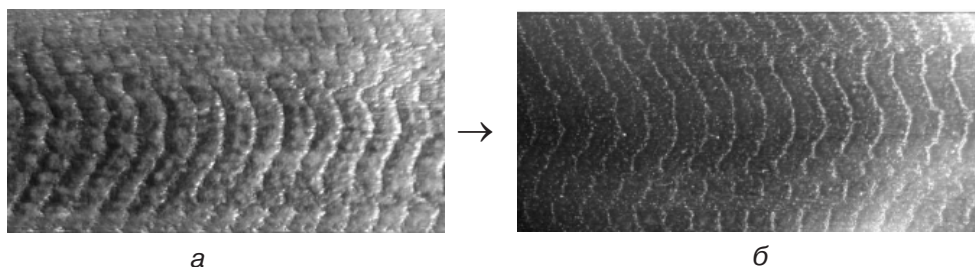


Рис. 3. Фото дефекта типа «рыбья чешуя»: а – свободная поверхность ленты (ширина 50 мм); б – контактная поверхность ленты (длина волны $\lambda \sim 7$ мм, направление литья показано стрелкой)

с частотой колебаний механической системы привода барабана. Возможные механизмы образования этого дефекта: засасывание пограничного слоя воздуха поверхностью барабана-кристаллизатора под лужицу расплава в зазоре «сопло-барабан» (рис. 2, а) [11] или её колебания вследствие капиллярных эффектов (рис. 4) [12]. Но аэродинамические дефекты (рис. 2, б) не всегда имеют периодичность, а колебания лужицы обычно приводят к нарушению геометрии ленты по другим параметрам – толщине, ширине, образованию зазубренных кромок [13]. Возможной причиной возникновения «рыбьей чешуи» могла быть стоячая волна в зазоре h сопло-барабан вследствие гидроудара вытекающей из сопла струи об его поверхность [14].

Отсюда следует, что качество поверхности ленты во многом определяется гидродинамикой жидкого металла, вытекающего из сопла, и его взаимодействием с поверхностью барабана. Поэтому изучение поведения вытекающей из сопла жидкости (расплава) является актуальной задачей.

В данной работе ставилась задача изучить такое поведение на модельной жидкости при её истечении из сопел разной конфигурации.

Методика модельных экспериментов

Для моделирования была создана установка, схема которой представлена на рис. 5. В качестве модельной жидкости использовали воду, которая по кинематической вязкости соответствовала таковой для аморфных сплавов в жидком состоянии [15, 16] (ν воды – $1,1-1,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с и ν рас-

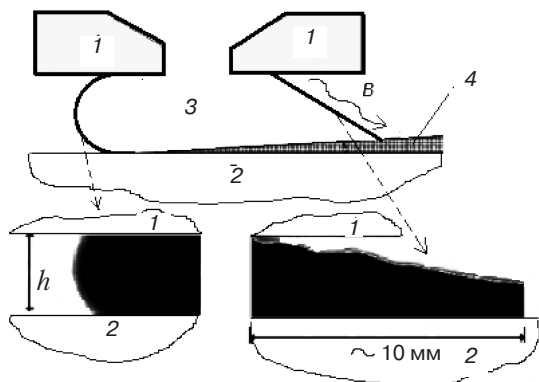


Рис. 4. Капиллярные эффекты в жидкой ванне расплава: 1 – сопло, 2 – барабан, 3 – ванна расплава, 4 – лента, h – зазор «сопло-барабан», B – волнообразный характер передней поверхности ванны; пунктирными стрелками указаны области съёмки жидкой ванны в собственном свечении расплава (сплав Al-7 % Si)[12]

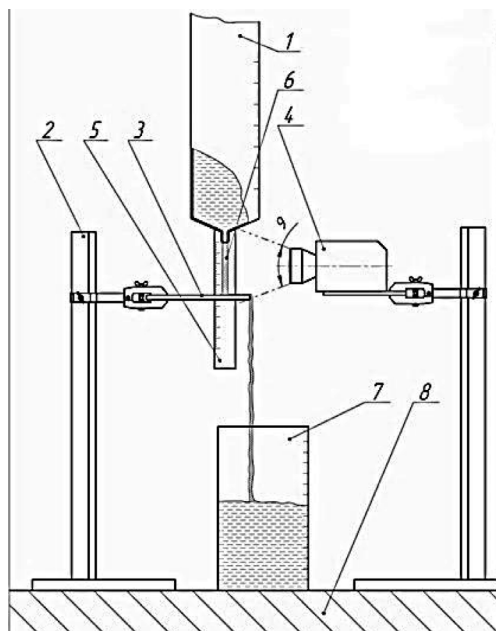


Рис. 5. Схема установки по изучению струи жидкости, вытекающей из сопла: 1 – ёмкость с жидкостью; 2 – штатив; 3 – твёрдая преграда; 4 – видеокамера; 5 – мерная линейка; 6 – струя жидкости; 7 – мерная ёмкость; 8 – платформа; 9 – сектор съёмки

Характеристики струи для различных сопел-насадок

Сопло \varnothing 2 мм				Сопло \varnothing 3 мм		Сопло \varnothing 3,5 мм	
$L_{ст.},$ см	$H, м$	$v, м/с$	μ	$v, м/с$	μ	$v, м/с$	μ
3,5	0,05	0,7500060	0,757234	0,905946503	0,914678	0,859959817	0,868248
4	0,10	1,0667868	0,761602	1,221117797	0,871782	1,16028609	0,828353
6,4	0,15	1,33274845	0,776878	1,452963046	0,846953	1,410042588	0,821934
7	0,20	1,5512486	0,783099	1,709970603	0,863225	1,618531375	0,817065
8	0,25	1,7801639	0,803786	1,908228065	0,86161	1,789086294	0,807815
8,5	0,30	1,9967897	0,823042	2,046278899	0,843441	1,934709597	0,797454
сопло \varnothing 4 мм				сопло \varnothing 5 мм		сопло \varnothing 6 мм	
14	0,05	0,97570875	0,985112	0,78829539	0,795893	0,793757384	0,801407
16	0,10	1,37224809	0,979678	1,055939448	0,753858	1,146281314	0,818355
18	0,15	1,65388106	0,964071	1,280029492	0,746148	1,413731689	0,824085
21	0,20	1,89746983	0,957878	1,463563132	0,738834	1,648914454	0,832403
22	0,25	2,10629191	0,951041	1,624853763	0,73366	1,860447118	0,840036
24	0,30	2,30109348	0,948471	1,769285209	0,729269	2,063306366	0,850459
сопло 5×0,5 мм				сопло 5×10 мм		сопло \varnothing 4×15 мм	
–	0,05	0,854700855	0,862938	0,860215054	0,868505	0,976800977	0,986215
–	0,10	1,22324159	0,873299	1,227370359	0,876246	1,385281385	0,988982
–	0,15	1,508295626	0,879207	1,509433962	0,879871	1,703940362	0,993252
–	0,20	1,768346596	0,892695	1,769911504	0,893485	1,96801968	0,993493
–	0,25	2,063983488	0,931937	2,0	0,903047	2,2084196	0,997154
–	0,30	2,275312856	0,937845	2,209944751	0,910901	2,424242424	0,999231

плава – $1,3-1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно). Поверхностное натяжение воды составляло $72-73 \text{ МДж}/\text{м}^2$ [17] против $1200-1400 \text{ МДж}/\text{м}^2$ [18] для расплава. Однако такая разница не противоречила поставленной задаче, так как стоячая волна труднее образуется в жидкости с меньшим поверхностным натяжением. Проводилась видеосъемка вытекающей струи, фиксировались эффекты этой струи (инверсия и длина стабильного отрезка) и её взаимодействие с неподвижной стенкой. Определяли скорость истечения струи и коэффициент расхода путём расчётов и экспериментально, меняя высоту столба жидкости H в ёмкости. Использовали сопла-насадки круглого ($\varnothing 2-6 \text{ мм}$) и прямоугольного сечения в виде щели ($0,5 \times 5, 0,5 \times 10$ и $0,5 \times 15 \text{ мм}$). Коэффициент расхода при истечении из круглых и щелевых сопел определяли по формуле:

$$\mu = \frac{v}{v_{\text{теор}}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{теор}}$ определяли по известному [19, 20] соотношению $\sqrt{2gh}$, м/с

Фактическую скорость истечения определяли экспериментально, используя выражение:

$$v = Q/S, \quad (2)$$

где Q – фактический расход при истечении, $\text{м}^3/\text{с}$, а S – площадь отверстия сопла, м^2 . Инверсию струи изучали на щелевых соплах, поскольку в соответствующей литературе [19, 20] она описана для струй круглого, квадратного и треугольного сечений. Предположение о возникновении стоячей волны при ударе о препятствие проверяли, направляя круглую ламинарную струю на плоскую прозрачную преграду (поз. 3, рис. 5).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Параметры вытекающей струи из сопел разной конфигурации представлены в таблице и на рис. 6. Установлено, что длина стабильной части круглой струи возрастает при увеличении скорости истечения и диаметра сопла (рис. 6, а). Причём, этот участок возрастает более интенсивно для сопла диаметром 4 мм по сравнению с 2-я мм. Эти результаты дают основание предположить, что при разливке расплава из круглых сопел-насадков при получении узких лент (до 5 мм шириной) предпочтительно применять больший диаметр, но не более 4 мм. В то же время коэффициент расхода для сопел всех конфигураций ведёт себя немонотонно, что выходит за рамки погрешности измерений. Наблюдается рост, уменьшение и волнообразное изменение μ (рис. 6, б), тогда как он должен быть постоянным для сопел конкретной формы [19]. Поэтому обнаруженный эффект требует дальнейшего изучения.

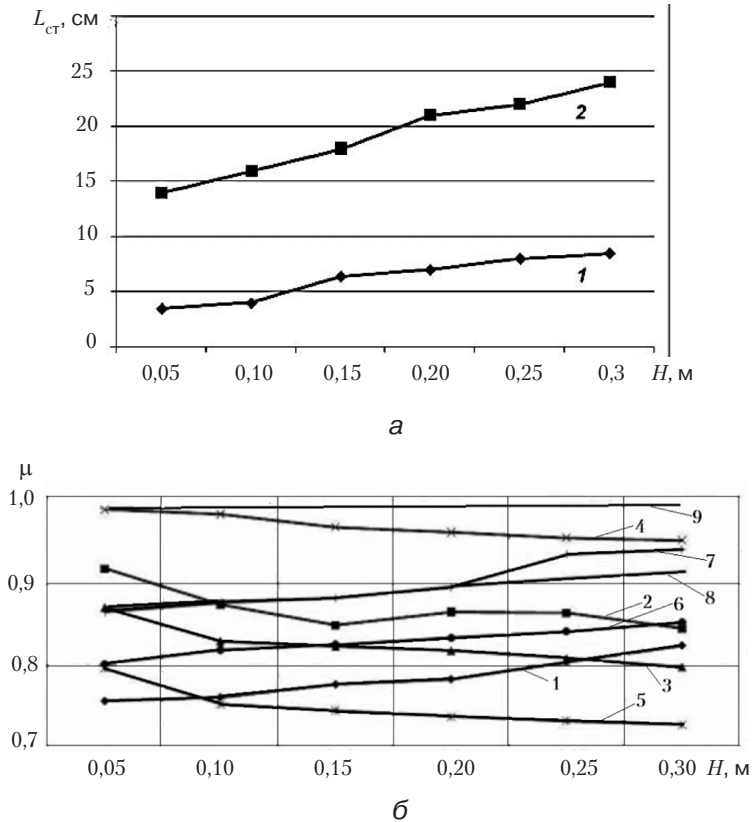


Рис. 6. Характеристики вытекающей струи: а – длина стабильного участка струи (\varnothing сопла, мм: 1 – 2, 2 – 4); б – коэффициент расхода из сопел разной конфигурации (\varnothing , мм: 1 – 2, 2 – 3, 3 – 3,5, 4 – 4, 5 – 5, 6 – 6, 7 – 0,5×5, 8 – 0,5×10, 9 – 0,5×10)

Формоизменение сечения плоских струй при инверсии также отличается (рис. 7) от извешного [19, 20]. Так, после выхода из щели жидкость образует цепочку овальных «звеньев», взаимно перпендикулярных друг другу (рис. 7, а). Их количество возрастает (до полного дробления струи) с уменьшением скорости истечения жидкости и длины щели сопла (рис. 7, а-в), но размер в вертикальном направлении уменьшается. Особенно наглядно это проявляется для щели размером 5×0,5 мм (рис. 7, а). При этом длина первого «полузвена» сразу на выходе из сопла растёт с ростом скорости истечения и при увеличении длины щели. Для сопел 5×0,5 и 10×0,5 мм (рис. 7, а, б) деформация струи прекращалась при малых скоростях истечения (малых столбах жидкости) и превращалась в ламинарный поток круглого сечения. Дробление струи при этом также начиналось раньше при малых скоростях

Гидродинамика процессов литья

струи (рис. 7, а-в). При увеличении длины щели сопла до 10 мм при определённой скорости истечения наблюдали необычный эффект разделения сплошного потока на два отдельных ручья, также состоящих из цепочки «звеньев», (рис. 7, б), но при увеличении длины щели до 15 мм разделение не наблюдалось. Такая «неклассическая» инверсия плоской струи, по всей видимости, требует дальнейшего изучения на других жидкостях и соплах другой конфигурации. В то же время, ленты шире 5 мм получают разливкой расплава именно из щелевых сопел [6-9, 14, 16], поэтому этот эффект имеет практическое значение.

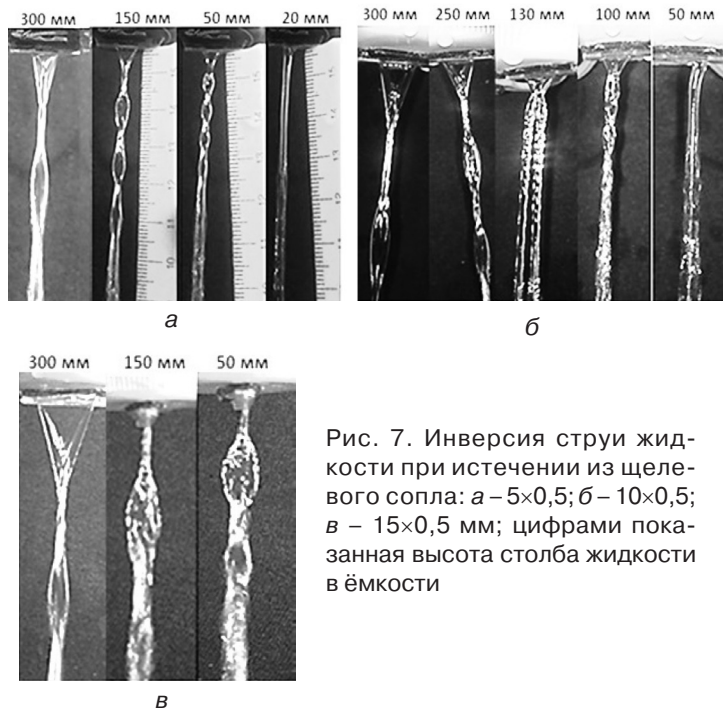
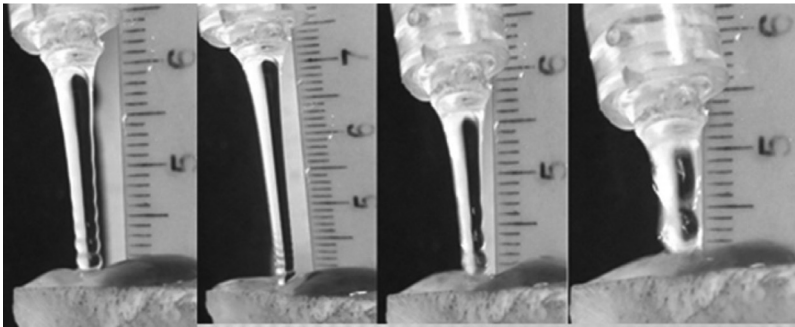


Рис. 7. Инверсия струи жидкости при истечении из щелевого сопла: а – 5×0,5; б – 10×0,5; в – 15×0,5 мм; цифрами показанная высота столба жидкости в ёмкости

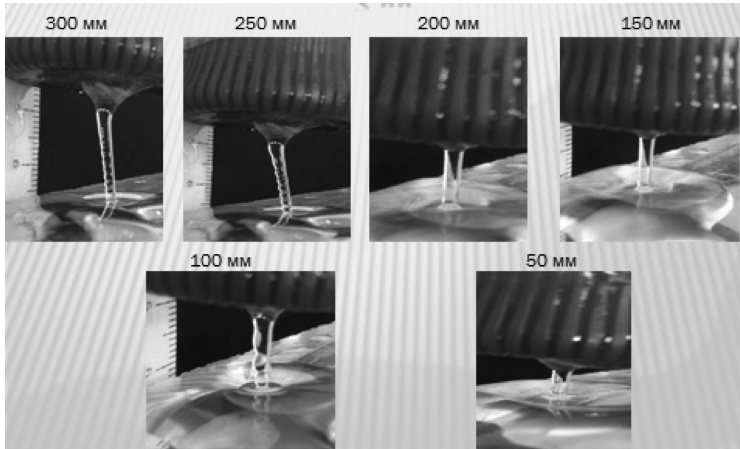
Результаты изучения инверсии струй из щелевидных сопел позволяют рекомендовать уменьшение зазора h (рис. 1) к десятым или даже сотым долям миллиметра при получении широких лент.

На свободной струе жидкости при встрече с преградой наблюдали волны, возникающие непосредственно у поверхности преграды (рис. 8, а) и при определённых условиях – распространяющиеся на всю струю от подложки до среза сопла (рис. 8, б, в), хотя в классической гидродинамике [19, 20] подобные волновые эффекты при взаимодействии струи жидкости с плоским препятствием отсутствуют. Образование волны в струе наблюдали для сопел диаметром 6 (рис. 8, а), 2 (рис. 8, б), 4 и 3, 5 мм (рис. 8, в). Частота волны уменьшалась при уменьшении диаметра струи и увеличении скорости струи (рис. 8, б, в). Уменьшение расстояния (зазора h), наоборот, увеличивало длину волны (рис. 8, а, в), а в некоторых случаях при малом зазоре волна вообще не просматривалась (рис. 8, б).

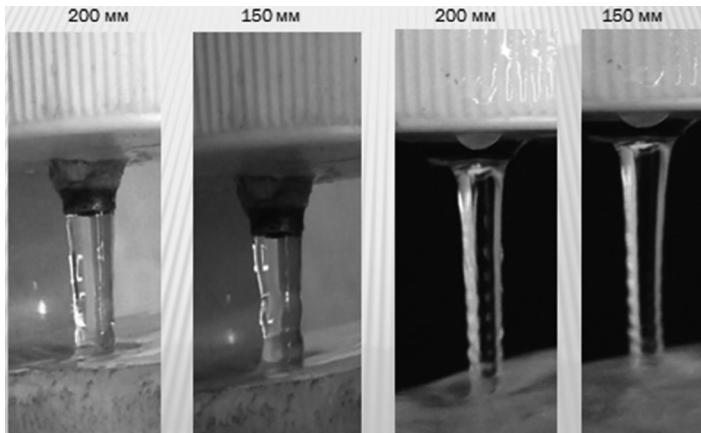
Волновые эффекты наблюдали и непосредственно на подложке (рис. 9). Их наблюдали даже при полном отсутствии волны в ламинарной струе жидкости при разной скорости струи и разных углах её наклона относительно плоскости подложки. Такие эффекты описывались в одной из ранних работ [21], посвящённых получению узких аморфных лент при разливке из круглых сопел, что подтверждает правомерность существования волнового эффекта при контакте струи жидкости с плоским твёрдым препятствием. Кромки пятна жидкости, которое образовывалось на поверхности подложки, имеют зазубренную форму (рис. 10). В реальных условиях



а



б



в

Рис. 8. Волны на струе жидкости при разливке из круглых сопел: а – 6 мм; б – 2; в – 4 (левая пара), \varnothing 3,5 (правая пара снимков); цифрами на снимках указанная высота столба жидкости в ёмкости

получения узкой ленты это приводит к образованию нерегулярных (с зазубринами) кромок, что указано в работах [21-23].

Выводы

Проведённое в работе моделирование условий истечения расплава из сопел разного поперечного сечения позволило сформулировать следующие выводы.

- Создана экспериментальная установка и отработаны методики определения

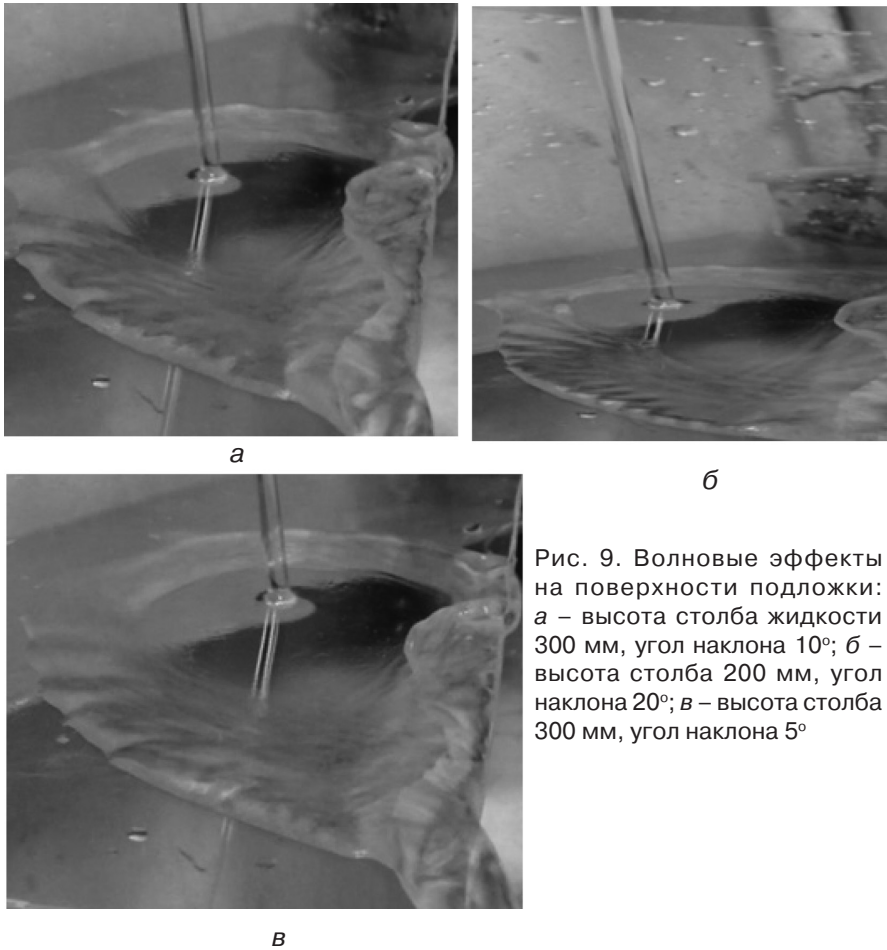


Рис. 9. Волновые эффекты на поверхности подложки: а – высота столба жидкости 300 мм, угол наклона 10°; б – высота столба 200 мм, угол наклона 20°; в – высота столба 300 мм, угол наклона 5°

гидродинамических характеристик струи жидкости, вытекающей из сопла в атмосферу с определённой скоростью.

- Проведена визуализация инверсии струй разного поперечного сечения и их взаимодействие с твёрдым плоским препятствием.

- Установлено нелинейное поведение коэффициента расхода при истечении жидкости из сопел разной конфигурации, отличное от классической гидродинамики, в диапазоне скоростей истечения соизмеримых с таковыми в реальном процессе получения ленты из расплава.

- Выявлены эффект стоячей волны в струе жидкости, падающей на препятствие, волновые эффекты жидкости непосредственно на подложке, а также необычная инверсия плоской струи.

- Показано, что инверсия плоской струи выражается в образовании цепочки взаимноперпендикулярных овальных элементов жидкости, длина цепочки при этом и количество таких элементов возрастает с уменьшением скорости струи. В то же время при малых скоростях истечения из щелевых сопел образуется ламинарная струя круглого сечения.

- Полученные результаты моделирования позволяют рекомендовать для реальных условий получения ленты из расплава разливку при малых зазорах «сопло-подложка» при получении широкой ленты, а также при увеличенном поперечном сечении сопла.



Список литературы

1. *Roderick I., Guthrie L.* Steel strips – The Long and Winding Road// ICS PROCEEDINGS, The 3rd International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Charlotte, North California, USA, 2005. – May 9-12, V. 1. – P. 691-702.
2. *Donghui L., Michaela I., Roderick I., Guthrie L.* Numerical Prediction and Experiments on Casting Fe-Based Amorphous Strips on a Twin Roll Caster and a Horizontal Single Belt Strip Caster// ICS PROCEEDINGS, The 3rd International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Charlotte, North California, USA, – 2005. – May 9 – 12, V. 1. – P. 713-719.
3. *Ревякин А. В.* Промышленное использование технологии непрерывной отливки тонкого листа// *Сталь*. – 2001. – № 5. – С. 27-30.
4. *Черняховский Б. П.* Преимущества и перспективы непрерывной разливки тонкой стальной полосы на двухвалковом модуле /Б. П. Черняховский, В. Б. Погорелов, В. Д. Смоляренко // *Металлург*. – 2001. – № 11. – С. 49-52.
5. А. с. 1053956 СССР, МКИЗ В 22 Д 11/06. Способ непрерывного литья заготовок/ В. К. Гребенков, В. П. Кузнецов, Б. В. Солодовников, В. Г. Овсянников. – № 3487297/22-02; заявлено 16.11.77; опубл. 15.11.83, Бюл. № 42.
6. *Филонов М. Р., Аникин Ю. А., Левин Ю. Б.* Теоретические основы производства аморфных и нанокристаллических сплавов методом сверхбыстрой закалки. – М.: «МИСИС». – 2006. – 328 с.
7. *Сребрянский Г. А.* Разработка концепции установок для получения аморфных лент закалкой расплава // *Сталь*. – 2011. – № 12. – С. 61-66.
8. *Золотарёв С. Н., Шумаков С. Н.* Рельеф контактной поверхности быстрозакалённых лент // *ФММ*. – 1987. – Т. 64. – вып. 2. – С. 349-357.
9. Влияние физических свойств расплавов на процесс разливки и формирование аморфных лент / Б. В. Молотилов и др.// *Сталь*. – 2003. – № 1. – С. 99-102.
10. *Huang S. C., Fiedler H. C.* Effects of wheel surface conditions on the casting of amorphous metal ribbons// *Met. Trans.* – 1981. – A12. – № 6. – P. 1107-1112.
11. *Fiedler H., Mьhlbach H., Stephani G.* The effect of main processing parameters on the geometry of amorphous metal ribbons during planar flow casting (PFC)// *J. of Mat. Sci.* – 1984. – № 19. – P. 3229-3235.
12. *Byrne, C. J., Theisen, E. A., Reed, B. L. & Steen, P. H.* Capillary puddle vibrations linked to casting-defect formation in planar-ow melt spinning. *Met. Mat. Trans.*, 2006, 37B (3). – P. 445.
13. U. S. Pat. № 4177856, МКИ2 В 22 Д 11/06. Critical gas boundary layer Reynolds number for enhanced processing of wide glassy alloy ribbons/ Liebermann H. H. Dec. 11, 1979.
14. *Сребрянський Г. О.* Управління якістю металевих стрічок на основі вдосконалення режиму розливу розплаву. дис... кан. техн. наук 05.16.02. – Т. О. Сребрянський – Дніпропетровськ, 2006.
15. *Физический энциклопедический словарь.* М.: Наука, 1985. – 1028 с.
16. *Сребрянский Г. А., Стародубцев Ю. Н.* Основные принципы совершенствования технологии производства аморфной ленты // *Сталь*. – 1991. – № 9. – С. 73-78.
17. *Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии / Под ред. Ю. Г. Фролова и А. С. Гродского.* – М.: Химия. – 1986. – 216 с. (72-73).
18. *Семенченко В. К.* Поверхностные явления в металлах и сплавах / В. К. Семенченко. – М.: Госиздат техн. – теор. Лит., 1958. – 491 с.
19. *Башта В. П.* Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / В. П. Башта. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
20. *Емцев Б. Т.* Техническая гидромеханика / Б. Т. Емцев. – М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.
21. *Anthony T. R., Cine H. E.* On the uniformity of amorphous metal ribbon formed by a cylindrical jet impinging on a flat moving substrate // *J. Appl. Phys.* – 1978. – V. 49. – № 2. – P. 829-837.
22. U. S. Pat. № 4177856, МКИ2 В 22 Д 11/06. Critical gas boundary layer Reynolds number for enhanced processing of wide glassy alloy ribbons/ Liebermann H. H. Dec. 11, 1979.
23. *Pavuna D.* On the improvement of metallic glass ribbons, geometry – the quenching stabilizer // *J. Non-Cryst. Sol.* – 1980. – 37. – P. 133-137.

Поступила 16.09.2015