

УДК 621.74.047:620.22

А. С. ЧЕЛУШКИН, Р. В. ДАШКИН

### КРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО СПОСОБУ «ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ»

Излагается гидравлический аспект способа получения литого композиционного материала по принципиальной схеме истечения жидких армирующих струй в жидкий движущийся расплав матрицы. Устойчивость процесса, выражается через комплекс, включающий в себя длину устойчивого участка струи. Приводятся эмпирические критериальные зависимости влияния параметров процесса на длину устойчивого участка струи от влияния. *Литые композиционные материалы; устойчивость истечения струи; время распада струи*

#### ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование техники требует новых материалов с более высокими свойствами. Такими материалами являются, в том числе, композиционные материалы (КМ). Появившись вначале как специализированные, узконаправленные, сейчас КМ нашли весьма широкое применение. Это обусловлено сущностью КМ, так как сочетание индивидуальных свойств армирующего и матричного компонентов обеспечивает комплекс характеристик, который сложно было бы получить традиционными способами обработки материалов.

Работоспособность композиционного материала в значительной мере зависит от принятых технологических режимов, которые, в свою очередь, выбираются исходя из метода получения КМ, поэтому методам изготовления КМ придается большое значение. Известно много технологических схем изготовления полуфабрикатов и изделий с композиционной структурой, например пропитка волокон жидким металлом в вакууме или под давлением, намотка или укладка волокон, лент или жгутов с последующей пропиткой под давлением, нанесение покрытий на волокна (плазменное, электролитическое, химическое и др.) с последующим прессованием, диффузионная сварка пакетов, полученных намоткой волокон на фольгу, сварка взрывом, компактирование и т. д. [4]

Следует отметить, что значительное место в машиностроении среди других КМ занимают композиционные материалы, полученные с использованием методов литья. Методы, базирующиеся на этих принципах, позволяют получать изделия различной конфигурации с небольшим объемом последующей обработки и обеспечивают минимальное силовое воздействие на армирующий компонент при изготовлении [2]. Считается, что для получения литых композиционных материалов высокого качества требуется строгое соблюдение условий совместимости компонентов [5]. Но эффект совместимости компонентов может быть достигнут в том числе управлением процессами формирования композиции, в основе которого закладывается механизм поведения армирующего и матричного компонентов в жидком виде [3].

#### 1. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА

На основе проведенного исследования на кафедре М и ТЛП УГАТУ предлагается способ литья композиционного материала, принципиальная схема которого представлена на рис.1. Расплав армирующего

материала 1 вытекает через фильеры в расплав матрицы 2 из тигля 3. Расплав матрицы 2 подается непрерывно в специальный тигель 4.

При этом образуется композиционная система в жидком виде, которая, двигаясь дальше в полости кристаллизатора 5, затвердевает, образуя композиционный слиток. Перемещение слитка и жидкой системы компонентов материалов 1 и 2 происходит за счет вытягивания закристаллизовавшейся части слитка 6. Безусловно, обстоятельством этого процес-

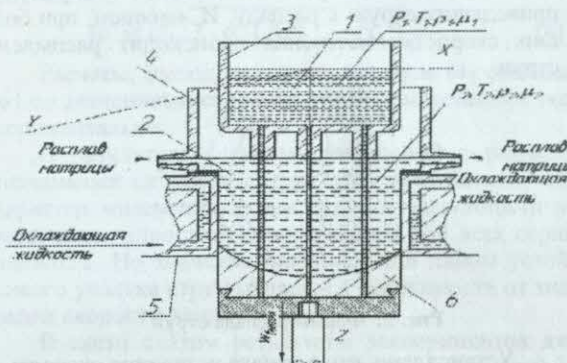


Рис. 1. Принципиальная схема процесса литья композиционного материала

са является сформированная в жидком виде устойчивая часть струи армирующего материала определенной длины. Процесс формирования КМ можно разбить условно на гидродинамический и термический аспекты. Формирование длины струи армирующего компонента в жидком состоянии зависит от гидравлических параметров процесса. Таким образом, управление процессом создания КМ требует знания закономерностей гидродинамического аспекта формирования армирующего компонента. Этот процесс можно разделить на: истечение армирующего материала в жидком виде и последующее устойчивое движение армирующих струй в среде матричного расплава.

#### 2. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Общепринято, что скорость истечения для незаотопленного отверстия определяется гидростатическим напором вытекающей жидкости относительно сечения отверстия, через которое происходит истечение, или разностью напора вытекающей жидкости и напором жидкости среды относительно затопленного отверстия. После истечения из насадки струя как при истечении в атмосферу, так и в жидкость,

спустя некоторое время распадается на капли [1]. Поэтому необходимо уметь рассчитывать длину устойчивого участка струи  $L$ , для того чтобы знать время, за которое струя успеет затвердеть до момента, когда произойдет распад струи. Промежуток времени, в течение которого сохраняется устойчивая форма струи называется временем распада  $T$ . Длина устойчивого участка  $L$  может быть выражена как произведение времени распада  $T$  и скорости струи  $w$ .

Распад, вызванный колебанием струи, связан с рядом возмущающих причин: турбулентностью, эллиптичностью сечения отверстия, шероховатостью стенок насадка и др. Влияние сил поверхностного натяжения заставляют струю пульсировать, развивающиеся возмущения поверхности могут привести к нарушению устойчивости течения, и распаду струи на капли. Наличие в жидкости сил вязкости, вызывающих диссипацию энергии, препятствуют развитию деформаций в струе. Пульсация среды, окружающей струю, значительно усиливает деформацию поверхности струи и ускоряет ее распад.

Экспериментальное изучение форм распада показывает, что при малых скоростях истечения струй жидкости развиваются осимметричные колебания и вызывают распад струи (см. рис. 2, а). При увеличении скорости истечения, в результате взаимодействия с окружающей средой устойчивость струи снижается из-за волнообразных колебаний (см. рис. 2, б), приводящих струю к распаду. И, наконец, при больших скоростях истечения происходит распыление струи.

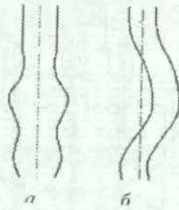


Рис. 2. Формы распада струй

Установлено, что в начале истечения скорость до определенного значения не влияет на устойчивость струи, что характеризуется постоянством времени начала распада  $T_0$ . При дальнейшем увеличении скорости струи происходит переход от осимметричных к волнообразным колебаниям. При этом значение времени распада начинает резко снижаться, пока не снизится до определенной величины, где вновь влияние скорости струи на время ослабевает. Величина времени распада струи  $T$  зависит от физических свойств материала струи и окружающей среды, размеров струи и скорости истечения [1]. Принято, что наибольшая длина устойчивого участка струи получается при значении критической скорости струи  $w_0$  и критического времени  $T_0$ . Поэтому, оценивая критическое время распада струи и критическую скорость истечения армирующего материала, можно прогнозировать длину устойчивого участка струи.

### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика, разработанная для расчета устойчивости струи, в основном, предназначена для случая истечения в невязкую неподвижную среду и относится к случаю истечения через затопленное отверстие [1]. Случай истечения струи через затоплен-

ное отверстие в движущуюся среду с резко отличающимися свойствами рассмотрен недостаточно для того чтобы можно было использовать имеющуюся методику при решении поставленной задачи. Поэтому существующие закономерности не могут использоваться для расчета длины устойчивого участка струи без экспериментальной проверки и уточнения.

В связи со сложностью изучаемой проблемы и отсутствием формализованного аналитического решения было решено провести исследования, используя метод подобия. С этой целью была сформулирована детерминистическая математическая модель процесса получения КМ по способу «армирующая струя – матричная жидкость». Математическая модель включает в себя: основные уравнения (Навье-Стокса, неразрывности) и условия единственности (начальные, граничные, и физические свойства материалов). На основе обработки математической модели методом обобщенных переменных был получен ряд комплексов для струи (индекс 1) и среды (индекс 2):

$$\frac{r \cdot w_1 \cdot \rho_1}{\mu_1}; \frac{\mu_1 \cdot w_1}{\sigma}; \frac{\Delta P}{\rho_1 \cdot w_1^2}; \frac{w_1^2}{g \cdot r}; \frac{w_1 \cdot t_1}{r}; \frac{\rho_1}{\rho_2}; \frac{\mu_1}{\mu_2}; \frac{w_2}{w_1} \quad (1)$$

Сформированные комплексы согласуются с комплексами, полученными методом размерности другими исследователями.

На основании полученного ряда комплексов была проведена серия экспериментов. Для установления качественных связей влияния геометрических параметров струи и скорости движения среды на длину устойчивого участка, было решено проводить исследования на однородных материалах. В связи с этим были исключены симплексы плотности и вязкости. Критериями оценки гидродинамических характеристик армирующей струи и потока матрицы

были выбраны числа Рейнольда  $Re_1 = \frac{r \cdot w_1 \cdot \rho_1}{\mu_1}$

$Re_2 = \frac{R \cdot w_2 \cdot \rho_2}{\mu_2}$ , Вебера  $We_1 = \frac{\rho_1 \cdot w_1^2 \cdot r}{\sigma}$ , Фруда

$Fr_1 = \frac{w_1^2}{g \cdot r}$ , где  $r$  – радиус струи,  $R$  – радиус кристал-

лизатора,  $w_1, w_2$  – скорости струи и среды,  $\rho_1, \rho_2$  – плотности армирующей и матричной жидкости,  $\mu_1, \mu_2$  – соответственно динамические вязкости,  $\sigma$  – межфазное натяжение на границе армирующая – матричная жидкость,  $g$  – гравитационная составляющая. Условно принято, что истечение происходит в среду, движущуюся ламинарно, в соответствие с предложенной схемой, поэтому  $Re_2 < 2000$ . Расчетные пределы значения критериев  $Re_1 = \{0 \dots 700\}$ ,  $Re_2 = \{133; 370; 430; 660; 1012; 1663\}$ ,  $We_1 = \{0 \dots 10\}$ ,  $Fr_1 = \{0 \dots 100\}$ . При этом изменение критериев зависит от изменения напора истекающей жидкости, радиуса отверстия, скорости матричной среды. Полученные экспериментальные данные для разных скоростей движения жидкой среды матричной жидкости по сериям в безразмерном виде представлены на рис. 3.

Внутри серии изменялась скорость истечения струи  $w_1$ , которая достигалась за счет разности гидростатического напора  $\Delta H_{12}$  армирующей  $H_1$  и матричной жидкости  $H_2$ .

По результатам эксперимента установлено, что по мере увеличения  $\Delta H_{12}$ , длина устойчивой части струи  $L$  сначала увеличивается и достигает своего максимального значения внутри серии.

На рис. 4 представлена максимальная длина устойчивой части струи, полученная при  $Re_2=370$  и радиусе струи  $r=0,75$  мм.

При дальнейшем увеличении  $\Delta H_{12}$  до определенного значения длина струи резко уменьшается. Последующее увеличение разности напоров приводит также к уменьшению длины устойчивого участка. При этом зависимость изменения длины устойчивого участка от величины  $\Delta H_{12}$  характеризуется линейной величиной. При большем увеличении напора струя сразу после выхода из насадка распыляется факелом.

#### 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенного эксперимента был выявлен факт, что при движении вязкой среды величина  $\Delta H_{12}$  не может служить для вычисления скорости по общепринятой формуле

$$w = \varphi \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H_{12}} \quad (2)$$

Таким образом, экспериментально установлено, что гидростатический напор, определенный как разница уровней жидкости струи и жидкости среды, в случаях истечения в вязкую движущуюся среду может принимать отрицательные значения.

В связи с этим возник вопрос об установлении зависимости влияния скорости движения среды на процесс истечения струи. Качественно процесс истечения характеризуется тем, что значение гидростатического напора струи, необходимого для истечения через затопленное отверстие в движущуюся среду, меньше, чем в случае истечения в неподвижную среду. В результате обработки экспериментальных данных получена эмпирическая количественная связь между величиной гидростатического напора струи и скоростью движения среды:

$$H_n = \frac{w_2}{\sqrt{0,235 \cdot n^2 - 0,59 \cdot n + 0,49}} \quad (3)$$

где  $w_2$  – скорость среды, (м/с),  $n$  – коэффициент, учитывающий относительную разницу напора истекаю-



Рис. 4. Критическая длина устойчивого участка струи

щей жидкости и значения напора, при котором струя не течет.

Таким образом, эффективный напор складывается из разности гидростатических напоров струи и среды  $\Delta H_{12}$ , и дополнительного слагаемого  $H_n$ . Скорость истечения струи предлагается рассчитывать по формуле:

$$w_1 = \varphi \sqrt{2 \cdot g \cdot (\Delta H_{12} - H_n)} \quad (4)$$

Расчеты, выполненные по формуле (4) совпадают со значениями скорости струи, замеренными экспериментально.

В результате сопоставления серий с разными значениями скорости среды было установлено, что характер изменения длины струи в зависимости от величины гидростатического напора для всех серий одинаков. Но значение максимальной длины устойчивого участка струи меняется в зависимости от значения скорости движения среды.

В связи с этим результаты экспериментов для разных серий со значением радиуса струи ( $r=0,75$  мм) были обобщены в комплексном виде:

$$\frac{L}{r} = f \left( \frac{r \cdot w_1 \cdot \rho_1}{\mu_1}; \frac{R \cdot w_2 \cdot \rho_2}{\mu_2} \right) \quad (5)$$

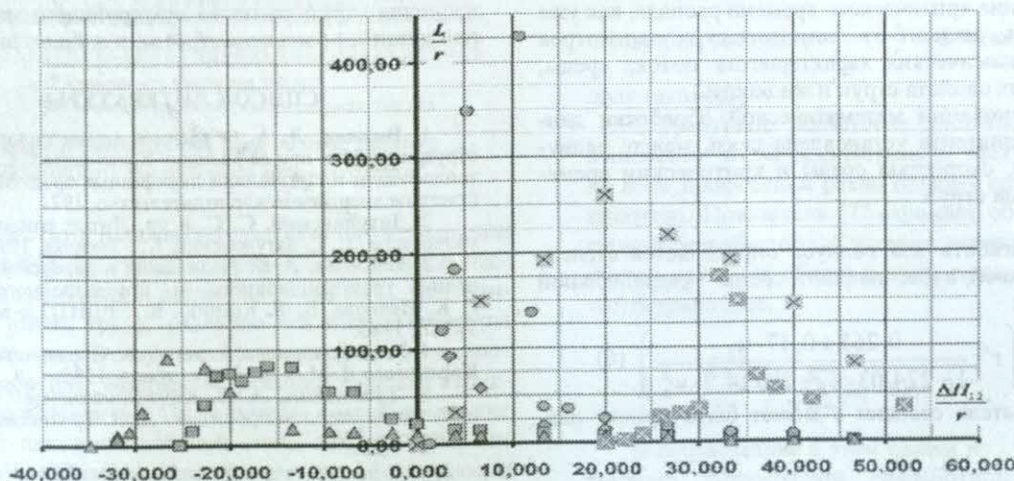


Рис. 3. Результаты эксперимента по исследованию влияния движения жидкой среды на процесс формирования КМ (значение числа Рейнольдса для среды по сериям:  $\times$  –  $Re_2=133$ ,  $\circ$  –  $Re_2=370$ ,  $\blacksquare$  –  $Re_2=655$ ,  $\blacksquare$  –  $Re_2=1012$ ,  $\blacktriangle$  –  $Re_2=1663$ )

Экспериментальные точки, представленные на рис. 3, образовали при оценочной проверке поверхность без особых выбросов. В результате наибольшая длина струи получена при значениях критериев  $Re_1 = 718$ ,  $Re_2 = 370$ ,  $Fr = 28$ ,  $We = 2,5$ . Аналитическая форма поверхности математически обработана и воспроизведена при помощи пакета MathCAD.

Длина устойчивого участка струи, как уже говорилось, может быть выражена через значения скорости и времени распада струи. В свою очередь, время распада определяется радиусом струи, динамическими характеристиками потока вязкой среды, физическими свойствами струи и среды.

На основании обработки установлена зависимость времени распада струи от скорости среды. Кроме того, время распада зависит от радиуса струи [1]. Выявлено, что при начале истечения время распада не меняется вплоть до критического момента, после которого происходит резкое уменьшение длины устойчивого участка. При этом зафиксировано наибольшее значение длины устойчивого участка струи.

Значение критической скорости для истечения в неподвижную среду определены [1] в виде критериальной зависимости, где комплекс, включающий критическую скорость струи является функцией, зависящей от определяющих критериев. Эти критерии представляют собой комплексы, которые состоят из физических свойств жидкости струи и среды, кроме того, они включают радиус струи. Критериальная функция критической скорости струи получена, по большей части, на основе обработки данных по истечению жидкостей из различных насадков в атмосферу; для случая истечения через затопленное отверстие дается лишь качественная связь. При этом истечение в движущуюся жидкую среду не рассматривается (см. [1]).

В связи этим требуется определение зависимости, отражающей изучаемый процесс. Результаты обработки эмпирических данных показывают, что связь критической скорости  $w_0$  струи и скорости среды  $w_2$  описываются степенной функцией, близкой к линейной функции ( $w_0 \sim w_2^n$ ). Таким образом критическая скорость струи может быть определена как критериальная функция, включающая в себя вышеуказанные комплексы, с дополнением комплекса, содержащего величину  $w_2^n$ .

Значение критического времени распада, как уже говорилось, зависит от геометрических параметров струи, динамических характеристик потока среды, физических свойств струи и жидкости.

На основании математической обработки данных эксперимента установлена связь между радиусом струи, скоростью среды и критическим временем распада струи.

Зависимость для радиуса определяется степенной функцией, а для скорости среды – рациональной функцией:

$$T_0 = K \cdot f \left( r^n; \frac{0,265 + 0,47 \cdot w_2}{1 - 224,03 \cdot w_2 + 20714,7 \cdot w_2^2} \right). \quad (6)$$

Показатель степени  $n$  может быть принят равным 2.

Проведенная работа дает возможность уточнить вид зависимости (5) в критериальном виде, что позволит использовать ее для расчета длины струи при истечении в жидкую движущуюся среду с другими радиусами насадка. Таким образом, критериальная зависимость длины устойчивого участка струи в общем виде:

$$\frac{L}{r} = f \left( \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{2}}; \frac{r \cdot w_1 \cdot \rho_1}{\mu_1}; \frac{R \cdot w_2 \cdot \rho_2}{\mu_2} \right), \quad (7)$$

где  $\frac{r}{R}$  – соотношение геометрических параметров

струи и потока среды. Зависимость (7) отражает картину влияния гидродинамических характеристик потока среды на устойчивость струи, кроме того, длина струи зависит от соотношения геометрических параметров и гидравлических характеристик самой струи.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам исследования предложенной схемы процесса литья КМ можно сделать вывод, что длина устойчивого участка струи зависит от скорости истечения струи и времени распада. В свою очередь время распада зависит от физических свойств жидкости струи и среды, радиуса струи, скорости движения среды. Это проявляется в том, что картина разрушения по характеру совпадает при различных скоростях среды. Выявлено, что наблюдается два участка: первый – где при увеличении скорости струи длина устойчивого участка возрастает, второй – где при увеличении скорости струи длина устойчивого участка струи уменьшается. При этом точкой перехода является критическая скорость струи, при которой получается наибольшая длина устойчивого участка струи. Установлено, что на протяжении первого участка значения времени распада остается постоянным. Предложена эмпирическая зависимость расчета скорости истечения струи в жидкую вязкую движущуюся среду.

Получены критериальные зависимости, позволяющие рассчитывать длину устойчивого участка струи для случая истечения затопленного отверстия в вязкую движущуюся среду, что создает основу для теоретического понимания и управления процессом введения струй расплава армирующего материала в движущийся расплав матрицы, в жидком виде.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витман, Л. А. О расчете длины сплошной части струи жидкости при её распаде / Кутатладзе С.С. // Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред. М.: Государственное энергетическое издательство, 1971.
2. Затуловский, С. С. и др. Литые композиционные материалы / С. С. Затуловский. К.: Техника, 1990.
3. Иванова, Р. К. Технология и передовой опыт внедрения композиционного и суспензионного литья / Р. К. Иванова, В. Я. Кезник. К.: РДНТП о-ва «Знание» УССР, 1986.
4. Композиционные материалы: Справочник / под ред. Карпиноса Д. М. – К., Наук. думка, 1985.
5. Тучинский, Л. И. Композиционные материалы, получаемы методом пропитки / Л. И. Тучинский. М.: Металлургия, 1986.