

УДК 669.71

Солянова А. А., Жиженко С. С., Агравал П. Г., Турчанин М. А.

ИЗУЧЕНИЕ РАСТВОРЕНИЯ ЧУГУНА И СТАЛИ В ЖИДКОМ АЛЮМИНИИ

При плавке алюминиевых сплавов и получении отливок из них жидкий металл находится в контакте с различными металлическими материалами, которые могут интенсивно растворяться в жидком металле. Сталь и чугун относятся к сплавам, из которых выполнены широко используемые в литейном производстве конструкционные и технологические элементы [1, 2]. Температура плавления стали и чугуна значительно выше температуры плавления алюминия, при этом происходит заметное взаимодействие жидкого расплава алюминия с чугунным и стальным инструментом. Это приводит к загрязнению алюминия железом и изменению его физико-химических, механических и технологических свойств. На сегодняшний день нет достаточной информации о механизме взаимодействия жидкого алюминия с чугуном и сталью, о скорости их растворения в жидком алюминии, о характере образующихся пограничных слоев.

Целями работы являются установление особенностей взаимодействия жидкого алюминия со стальными и чугунными изделиями, а также определение характера и состава контактных слоев.

Взаимодействие твердых чугуна и стали с жидким алюминием было изучено методом погружения при изотермических условиях. Для проведения опытов были использованы следующие материалы: сталь марки Ст. 30 (ГОСТ 1050-88) [1]; чугун марки СЧ 20 (ГОСТ 1412-85) [2]; чистый алюминий марки ЧДА (99,90% (мас.)) (ГОСТ 11069-2001) [3]. Высота цилиндрических стальных и чугунных образцов составляла $h = 41$ мм, диаметр – $\varnothing = 5$ мм. При таких геометрических размерах масса образцов составляла $m = 7,5$ г. Графитовые тигли, содержавшие жидкий алюминий, имели наружную высоту $H_n = 142$ мм, внутреннюю высоту $h_{вн} = 134$ мм, наружный диаметр $\varnothing_n = 99$ мм и внутренний диаметр $\varnothing_{вн} = 69$ мм. Выдержку образцов в жидком алюминии проводили при температуре 700°C в электропечи шахтной лабораторной СШОЛ-1.1,6/11-М1. Для изучения растворения чугунных и стальных образцов проводились отдельные эксперименты. В ходе каждого эксперимента были использованы по 1 кг чистого алюминия и по три образца с соответствующим временем выдержки 2, 4 и 6 часов.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. Образцы подвешивали на металлической крестовине (рис. 1, а), которая одевалась на тигель (рис. 1, б). Специальная конструкция подвески образцов позволяла регулировать глубину их погружения в алюминий и вынимать отдельные образцы из тигля после истечения необходимого времени выдержки в жидком алюминии, не прерывая опыты по изучению растворения других образцов. В ходе опытов образцы погружались в жидкий алюминий на $2/3h$. При такой степени погружения образцов, даже в случае их полного растворения, концентрация железа в алюминии при температуре опытов оставалась меньше предела насыщения, что обеспечивало сохранение движущей силы процесса растворения в ходе всего эксперимента.

После выдержки образцов погруженных в алюминий в течение необходимого времени они извлекались из печи и охлаждались на воздухе. Так как при контакте алюминия с материалами на основе железа образуются хрупкие и твердые интерметаллические слои, которые создают трудности при изготовлении шлифов, перед разрезанием образцы помещались в пластиковую оболочку диаметром 20 мм и заливались эпоксидной смолой. Процесс изготовления шлифов состоял из следующих операций: разрезания образцов, грубой и тонкой шлифовки с последующей полировкой, травления. Разрезание пластиковой оболочки с образцами осуществлялось на алмазном круге. Шлифовка производилась на шлифовально-полировальном станке марки ПШСМ-2. Полировка образцов выполнялась на шкурке с алмазной

пастой, на войлоке с пастой Гои. Окончательная полировка производилась на фетре с водной суспензией окиси хрома. При проведении полировки шлиф протирался 90 %-раствором этилового спирта. Образцы были подвергнуты травлению в 4%-растворе азотной кислоты.



Рис. 1. Оснастка для проведения экспериментов по изучению скорости растворения стальных и чугуновых образцов в жидком алюминии:

а – металлическая крестовина с образцами; б – металлическая крестовина на тигле

Изучение микроструктуры нетравленных и травленных шлифов было выполнено с использованием лабораторного оптического микроскопа марки МИМ-8М при увеличении 150 крат и оптического бинокулярного микроскопа марки МБС-2 при увеличении 5 крат. Микротвердость структурных составляющих определялась с помощью прибора ПМТ-3.

На рис. 2 представлены поперечные шлифы исходных (рис. 2, а, б) и выдержанных в жидком алюминии (рис. 2, в–з) стальных и чугуновых образцов. Как следует из рис. 2, в, д, ж, в результате взаимодействия стали с алюминием на всей поверхности контакта образуются твердые реакционные слои, и происходит интенсивное растворение стали в алюминии, которое выражается в уменьшении остаточного диаметра образцов стали со временем. Заметное взаимодействие чугуна и алюминия наблюдается только при времени выдержки 4 ч и более (рис. 2 е, з), при этом взаимодействие развивается только в отдельных очагах, вокруг которых формируются твердые реакционные слои направленные, как вовнутрь образца чугуна (в меньшей степени), так и наружу (в большей степени). В целом, растворение чугуна в алюминии происходит не так интенсивно как стали.

Для количественного описания скорости процесса растворения образцов был принят следующий подход. В случае стальных образцов, для каждого шлифа были проведены следующие построения: был восстановлен его начальный диаметр d_1 и средний остаточный диаметр не взаимодействовавшего материала d_2 после выдержки в жидком алюминии. На каждом шлифе был обозначен диаметр d_3 , ограничивающий область максимального проникновения реакционного слоя. Результаты этих построений представлены на рис. 2, а, в, д, ж, а также сведены в табл. 1. Взаимодействие чугуновых образцов с жидким алюминием характеризуется формированием наружной области взаимодействия в начальный момент времени, с последующим проникновением реакционной зоны вглубь матрицы чугуна после ее значительного развития. Поэтому для шлифов чугуновых образцов были восстановлены начальный диаметр образца d_1 ; диаметр d_2 , ограничивающий область максимального проникновения реакционного слоя в чугун; диаметр d_3 , характеризующий наружную область взаимодействия. Результаты этих построений показаны на рис. 2, б, г, д, е и сведены в табл. 2.

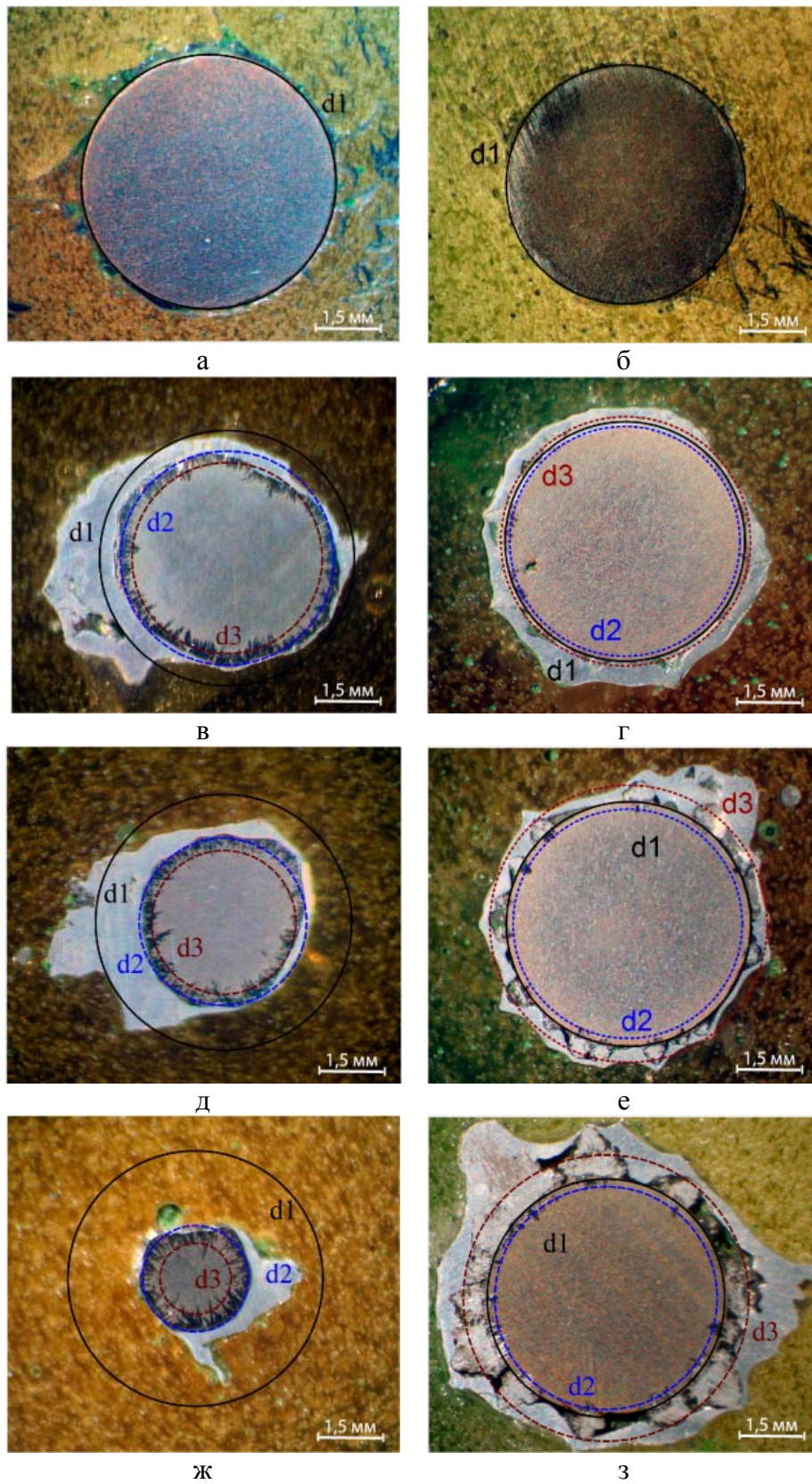


Рис. 2. Поперечные шлифы стальных и чугуновых образцов с нанесенными диаметрами: а – стальной образец, 0 ч выдержки; б – чугуновый образец, 0 ч выдержки; в – стальной образец, 2 ч выдержки; г – чугуновый образец, 2 ч выдержки; д – стальной образец, 4 ч выдержки; е – чугуновый образец, 4 ч выдержки; ж – стальной образец, 6 ч выдержки; з – чугуновый образец, 6 ч выдержки

В рамках выбранного подхода скорость растворения стального образца может быть охарактеризована как скорость изменения его диаметра со временем. Исходя из данных табл. 1 можно сделать вывод о том, что при температуре 700 °С и выбранных временах выдержки растворение стальных образцов происходит с постоянной скоростью ~0,2 мм/ч. В случае взаимодействия чугуна с алюминием говорить об истончении образца не допустимо, так как элементы начальной поверхности сохраняются даже после выдержки 6 ч (рис. 2, г, е, з). В этом случае, скорость взаимодействия может быть охарактеризована скоростью нарастания наружной области толщиной $\delta_{нар}$ и скоростью формирования реакционной зоны толщиной $\delta_{вн}$. Следует отметить, что обе скорости с течением времени увеличиваются.

Таблица 1

Данные об остаточном диаметре образцов, диаметре реакционной зоны и скорости растворения стальных образцов

Время погружения образца, ч	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	Длина «языков», мм	Скорость растворения образца, мм/ч
0	5	–	–	–	–
2	5	4,25	3,60	0,33	0,188
4	5	3,40	2,72	0,34	0,200
6	5	2,05	1,33	0,36	0,246
Среднее:				0,34	0,21 ± 0,06

Таблица 2

Данные о диаметрах и толщинах контактных слоев, характеризующих взаимодействие чугуна с алюминием

Время выдержки образца, ч	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	$\delta_{вн}$, мм	$\delta_{нар}$, мм	Скорость проникновения внутрь, мм/ч	Скорость нарастания наружной области, мм/ч
0	5	–	–	–	–	–	–
2	5	4,81	4,80	0,10	0,10	0,050	0,050
4	5	4,69	5,66	0,16	0,33	0,078	0,125
6	5	4,52	6,00	0,24	0,50	0,120	0,250
Среднее:						0,083	0,14 ± 0,20

Особенности скоростей растворения чугуна и стали в жидком алюминии тесно связаны с характером образующихся граничных слоев и их фазовым составом. На рис. 3 приведены микроструктуры пограничных слоев сталь – алюминий и чугун – алюминий при различных временах выдержки. Основными чертами пограничных слоев сталь – алюминий является формирование «языкоподобной» структуры, проникающей в матрицу стали. При этом на различных участках глубина проникновения «языков», а, следовательно, толщина реакционной зоны заметно меняются. При времени погружения 4–6 ч на отдельных участках формируются «островки» реакционной зоны в стальной матрице. Нами были определены максимальные δ_{max} , средние δ_{cp} и минимальные δ_{min} длины «языков». Результаты построений показаны на рис. 3, а, в, д. Из полученных результатов следует, что характерные длины «языков» с течением времени не изменяются и, в среднем, составляют $\delta_{max} = (0,4 \pm 0,1)$ мм; $\delta_{cp} = (0,2 \pm 0,1)$ мм; $\delta_{min} = (0,08 \pm 0,02)$ мм. Это может свидетельствовать о том, что скорость роста реакционной зоны на границе сталь – алюминий и скорость растворения реакционной зоны в алюминии одинаковы.

Основными чертами пограничных слоев чугун – алюминий является формирование и рост со временем наружной области на поверхности образца и проникновение вглубь образца реакционной зоны. При этом на различных участках величина нароста, и, вместе с ним толщина граничного слоя, заметно меняются. Нами были оценены средняя толщина наружного

слоя $\delta_{нар}$ и средняя толщина реакционной зоны $\delta_{вн}$. Результаты построений показаны на рис. 3б, г, е. Значения $\delta_{нар}$ составили $(0,32 \pm 0,25)$ мм для 2 ч выдержки; $(0,4 \pm 0,3)$ мм для 4 ч выдержки; $(0,7 \pm 0,6)$ мм для 6 ч выдержки. Значения $\delta_{вн}$ составили $(0,16 \pm 0,06)$ мм для 2 ч выдержки; $(0,2 \pm 0,1)$ мм для 4 ч выдержки; $(0,3 \pm 0,1)$ мм для 6 ч выдержки. Из полученных результатов следует, что характер роста отличается от пограничной зоны сталь – алюминий. В зоне чугуна – алюминий наросты и внутренние языки с течением времени увеличиваются.

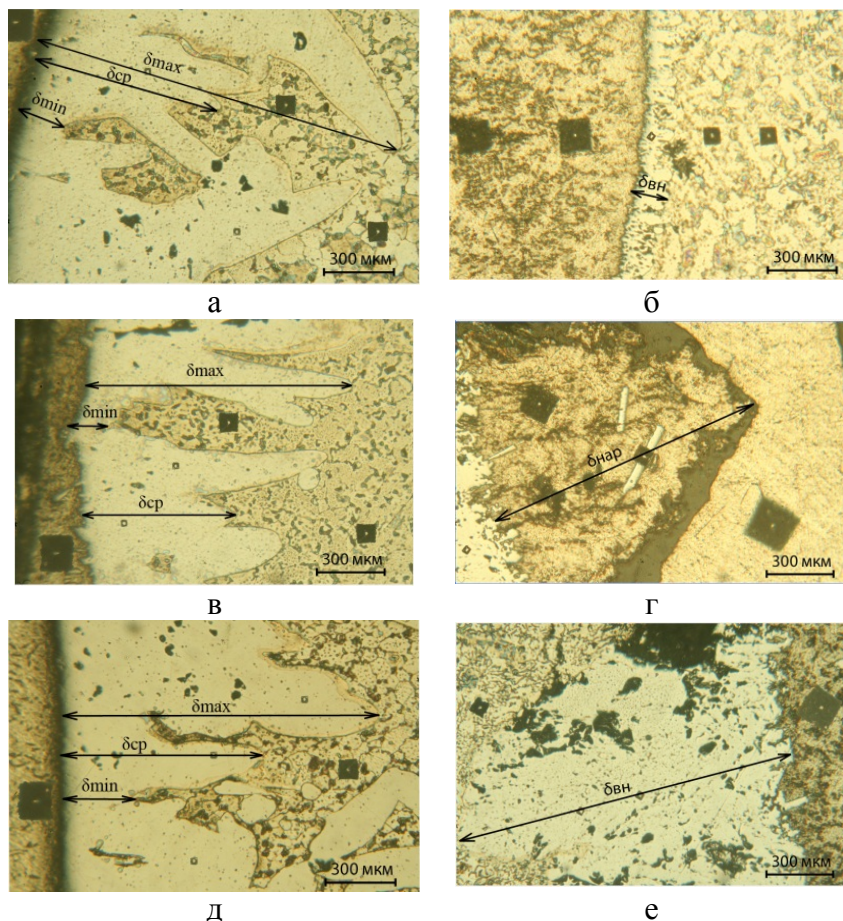


Рис. 3. Микроструктура пограничных слоев сталь – алюминий и чугун – алюминий с нанесенными длинами языков:

а – слой сталь – алюминий, 2 ч выдержки; б – слой чугун – алюминий, 2 ч выдержки; в – слой сталь – алюминий, 4 ч выдержки; г – слой чугун – алюминий, 4 ч выдержки; д – слой сталь – алюминий, 6 ч выдержки; е – слой чугун – алюминий, 6 ч выдержки.

Результаты изучения микротвердости различных областей шлифов (табл. 3, 4) показали, что наибольшей твердостью обладает реакционная зона. Спектр значений микротвердости данной зоны составляет 7 948–8 910 МПа для стальных образцов и 6 772–9 458 МПа для чугунных образцов. Это говорит о том, что эта реакционная зона может быть сформирована интерметаллическими соединениями.

Характерная «языкоподобная» структура стальных образцов позволяет высказать предположение о формировании в данном слое соединения Fe_2Al_5 . Известно, что скорость роста фазы Fe_2Al_5 с орторомбической решеткой максимальна в направлении оси С, которая совпадает с осью монокристаллита, имеющего форму языка. Скорости роста фаз Fe_2Al_5 и $FeAl_3$ в других направлениях – величины одного порядка. Анизотропией скорости роста Fe_2Al_5 и объясняется языкообразная форма слоя [4].

Для чугунных образцов было установлено, что микротвердость наружной зоны имеет спектр значений 540–580 МПа, что отличается от железной и алюминиевой матрицы.

Таблица 3

Микротвердость слоев реакционной зоны сталь – алюминий

Время выдержки, ч	Номер измерений	Железная матрица (сталь Ст30), МПа	Реакционная зона, МПа	Алюминиевая матрица, МПа
0	1	1460	-	-
	2	1426	-	-
2	1	1460	7948	361
	2	1426	7948	378
4	1	1881	8408	392
	2	2515	7948	392
6	1	1361	8408	365
	2	1330	8910	-
Среднее:		1607	8262	378

Таблица 4

Микротвердость пограничных слоев чугуна – алюминий

Время выдержки, ч	Номер измерений	Железная матрица (чугун СЧ20), МПа	Реакционная зона, МПа	Двухфазная зона, МПа	Алюминиевая матрица, МПа	Включения, МПа
0	1	3405	-	-	-	-
	2	3667	-	-	-	-
2	1	1881	-	582	314	-
	2	1933	-	557	-	-
4	1	1570	7948	541	258	1495
	2	1693	6772	-	-	-
6	1	1495	8910	-	325	-
	2	1570	9458	-	-	-
Среднее:		2173	8272	560	299	1495

ВЫВОДЫ

1. Скорость растворения стальных образцов в алюминии многократно превосходит скорость растворения чугунных образцов идентичной формы.

2. Скорость образования реакционной зоны сталь – алюминий и скорость ее растворения в алюминии сопоставимы. Показано, что чем больше толщина наружного двухфазного слоя, тем более развитой оказывается реакционная зона чугуна – алюминий.

3. Реакционная зона сталь – алюминий и чугуна – алюминий сформирована интерметаллическими соединениями $FeAl_3$ и Fe_2Al_5 . Характерная «языкоподобная» форма пограничного слоя сталь – алюминий обусловлена анизотропией скорости роста Fe_2Al_5 .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат, калиброванная сталь: ГОСТ 1050-88. ССБТ – [Введ. с 01.01.1991] – М. : Издательство стандартов, 1996. – 17 с. – (Национальные стандарты Украины).

2. Чугун с пластинчатым графитом для отливок: ГОСТ1412-85. ССБТ – [Введ. с 01.01.1987] – М. : Издательство стандартов, 2004. – 3с. – (Национальные стандарты Украины).

3. Алюминий первичный, марки : ГОСТ111069-2001. – [Введ. с 01.01.2003] – М. : Издательство стандартов, 2004. – 6 с. – (Межгосударственный стандарт).

4. Автоматическая сварка / В. Н. Еременко, Я. В. Натанзон, В. И. Дыбков, В. Р. Рябов. – М. : Металлургия, 1974. – № 2. – С. 5–8.

Статья поступила в редакцию 26.02.2014 г.