

**В. И. Белик, Г. П. Борисов, В. М. Дука**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ВОДОРОДНОЕ РАФИНИРОВАНИЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВТОРИЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**

*Дана сравнительная оценка различных методов рафинирования при производстве вторичных алюминиевых сплавов, показаны положительное воздействие процесса водородного рафинирования на прочность и плотность сплава и пути повышения его эффективности.*

**Ключевые слова:** рафинирование, алюминиевый сплав, прочность, плотность.

*Наведена порівняльна оцінка різних методів рафінування при виробництві вторинних алюмінієвих сплавів, показано позитивний вплив процесу водневого рафінування на міцність та щільність сплаву та шляхи збільшення його ефективності.*

**Ключові слова:** рафінування, алюмінієвий сплав, міцність, щільність.

*The comparative estimation of various methods of refinement at manufacture of secondary aluminium alloys is carried out; it is shown positive influence of process of hydrogen refinement on strength and density of an alloy and ways of increase of its efficiency.*

**Keywords:** refinement, aluminium alloys, strength, density.

Одной из причин малой распространенности в литейном производстве технологии литья газонасыщенных сплавов является неравномерность пористости по высоте отливки, вызванная перераспределением водорода при ее затвердевании. В работе [1] описана эта проблема и показаны пути ее преодоления. Процесс всплывания пузырьков при затвердевании отливки, оказывающий негативное влияние на качество при литье газонасыщенных сплавов, может оказаться весьма полезным в условиях обычного литья. Так, именно рафинирующим воздействием всплывающих пузырьков водорода объясняется [2] увеличение прочности и пластичности образцов, отлитых из расплава, газонасыщенного путем выдержки при высокой температуре и охлажденного введением в него твердой шихты. Удалением из силуминовых расплавов неметаллических включений объясняется и повышение механических свойств сплава в результате водородной обработки [3]. Причиной повышения свойств является процесс водородного рафинирования (ВР), сопровождающий водородную обработку сплава.

Суть ВР – образование пузырьков водорода на неметаллических включениях и их всплывание вместе с включениями в расплаве.

Необходимым условием образования пузырька является пересыщение раствора водорода, которое возникает, например, при снижении растворимости водорода, вызванном снижением температуры расплава или давления над расплавом, или при создании термодинамических условий за счет реакции жидкого алюминия с парами воды. Чем выше степень пересыщения, тем более мелкие НВ становятся зародышами образования пузырьков, тем выше полнота очистки расплава от НВ.

В работе [4] рассмотрены условия, при которых возможно образование пузырька водорода в расплаве без снижения его температуры, в частности, установлена связь величины пересыщения и размера удаляемого неметаллического включения, а в работе [5] предложен двухстадийный процесс водородного рафинирования, включающий создание пересыщения расплава водородом за счет газонасыщения расплава при реакции с парами воды и последующее снижение содержания водо-

рода любыми известными методами; проверка в лабораторных условиях показала положительное влияние ВР на герметичность, прочность и плотность отливок.

Отмеченное выше положительное влияние ВР на свойства отливки достигалось в тех случаях, когда ВР осуществлялось в процессе обработки расплава перед получением отливки. Общеизвестно, что в процессе затвердевания отливки при наличии соответствующих условий происходит образование газовых пор, и традиционный подход к повышению качества отливки (если речь идет не о литье газонасыщенных сплавов) состоит в создании условий, препятствующих их образованию, то есть расплав рафинируют, а скорость затвердевания отливки по возможности увеличивают. Между тем, образование пор можно рассматривать как своеобразную очистку металла от растворенного в нем водорода. Этот подход позволяет использовать образование пор для повышения свойств сплава, что возможно в том случае, если литое изделие является не конечным продуктом, а заготовкой для последующего литья, чушкой: водород, образовавшийся в ней поры, в ходе последующего переплава всплывает на поверхность расплава в виде пузырьков, унося с собой НВ. Такая логика приводит к неожиданному выводу, что для повышения плотности отливки следует стремиться к получению чушек с большой пористостью. Это противоречит традиционным требованиям литейщиков к величине пористости в чушках, отраженных в соответствующих стандартах. Metallурги, добиваясь снижения балла пористости чушек, используют различные методы рафинирования расплава, что повышает себестоимость продукции. Естественно, что использование этих методов распространено и при производстве вторичных сплавов на специализированных металлургических предприятиях, поставляющих значительную часть сплавов, потребляемых литейщиками на Украине, поскольку получаемый переплавом загрязненного лома металл загрязнен и НВ, и водородом. В то же время некоторые литейные предприятия изготавливают сплавы самостоятельно, причем, минуя стадию получения чушек (что позволяет снизить энергозатраты), используют расплав непосредственно для получения отливок.

Можно предположить, что различия в технологическом процессе, состоящие в наличии стадии получения чушек или в ее отсутствии, требуют и различных методов рафинирования, обеспечивающих требуемое качество сплава.

В настоящей работе произведена сравнительная оценка различных методов рафинирования расплава, в том числе специальными препаратами, продувкой азотом и водородным рафинированием.

Начальная стадия работы проведена в лабораторных условиях. Исследовалось влияние эффективности процесса ВР в зависимости от степени газонасыщения расплава, скорости затвердевания отливки и последующего ее переплава. В качестве критериев эффективности процесса ВР приняты величина пористости и прочности литого металла.

С целью исследования прочности сплава отливалась специальная заготовка [6] длиной 83 мм, толщиной 15 мм, высотой (вместе с прибыльной частью) 34 мм. Заготовку отливали в вытряхном кокиле, изготовленном из чугуна, нижняя плоскость отливки оформляется отдельной чугунной плитой толщиной 20 мм, толщина стенок кокиля – 15 мм. Для улучшения условий питания отливки в верхнем торце кокиля по периметру прибыли на высоту прибыли (15 мм) выполнено углубление шириной 10 мм, заполняемое минеральной ватой. Толщина стенки прибыльной части кокиля составляет 2 мм. Одновременно заливали два кокиля, температура первого – 15-20 °С (далее – холодный кокиль), второго – 275-295 °С (горячий кокиль). Конструкция кокиля позволила обеспечить хорошее питание отливки. После отрезки прибыли методом гидростатического взвешивания определяли плотность отливки, относительную пористость рассчитывали, сравнивая плотность данной отливки с максимальной плотностью металла отливки, зафиксированной в данном эксперименте. Из полученной заготовки изготавливали образец для испытаний на прочность № 16 К с диаметром рабочей части 8 мм.

## Получение и обработка расплавов

Отливка для последующего переplава представляла собой цилиндр диаметром 50 мм и высотой  $130 \pm 15$  мм. Для ее получения использовались чугунные кокили с толщиной стенок 2 и 15 мм (далее – тонкостенный и толстостенный кокили), что обеспечивало разницу в длительности затвердевания отливок примерно в 7 раз.

Эксперимент проведен в два этапа. На первом расплав АК7 массой 10 кг газонасыщали в чугунном тигле погружением колокольчика, заполненного влажной минеральной ватой под зеркало металла. Длительность обработки составляла 3 мин, температура расплава в процессе газонасыщения и последующей выдержки – 720-730 °С. Из исходного расплава (и по мере выдержки газонасыщенного расплава) через 3, 30, 90 мин после окончания газонасыщения получали отливки в тонкостенном и толстостенном кокилях. Параллельно отливали две заготовки для последующего определения механических свойств.

На втором этапе эксперимента полученные цилиндрические отливки расплавляли в графито-шамотном тигле и при температуре 720-730 °С отливали две заготовки для последующего определения механических свойств, температура кокилей выдерживалась такая же, как и на первом этапе эксперимента. Величины пористости отливок и заготовок приведены в табл. 1.

Сравнивая величины пористости заготовок, полученных до и после переplава, можно отметить, что переplав привел к уменьшению пористости во всех случаях. Однако в случае переplава отливок из исходного расплава пористость заготовок уменьшилась примерно в полтора раза, тогда как при переplаве отливок из газонасыщенного расплава (если сравнивать средние значения пористости заготовок) она уменьшилась более чем в 20 и 10 раз, соответственно для заготовок, полученных в холодном и горячем кокилях. В результате пористость заготовок, полученных из переplавленного газонасыщенного металла в холодный кокиль (0,08 %), ниже в 2 раза, чем заготовок, полученных из переplавленного исходного расплава (0,20-0,22 %).

Итак, можно отметить, что эффект уменьшения пористости отливок после переplава сильнее выражен в случае высокого газосодержания расплава (что достигалось его газонасыщением) и быстрого затвердевания отливки (заготовки, полученные в холодном кокиле). Минимальная пористость зафиксирована на заго-

**Таблица 1. Величина пористости отливок «цилиндр» и заготовок, полученных на различных этапах эксперимента**

Вид отливки	Первый этап эксперимента				Второй этап эксперимента				
	отливка «цилиндр»		заготовка для определения прочностных свойств						
	толщина стенок кокиля, мм		А		Б		В		
Вид обработки			температура кокиля, °С						
	15	2	15-20	275-295	15-20	275-295	15-20	275-295	
пористость, %									
Исходный расплав	0,96	0,96	0,33	0,36	0,22	0,31	0,20	0,22	
Длительность выдержки, мин:	3	2,73	4,28	1,78	2,27	0,17	0,15	0,11	0,24
	30	3,10	4,62	1,75	2,20	0,04	0,20	0,00	0,16
	90	3,11	4,62	1,05	1,54	0,04	0,20	0,13	0,26
Среднее***	2,98	4,51	1,53	2,00	0,08	0,18	0,08	0,22	

**Примечания:** А – заготовки отлиты параллельно с отливками цилиндров; Б – из переplавленных отливок цилиндров, полученных в кокиле с толщиной стенок 15 мм; В – из переplавленных отливок цилиндров, полученных в кокиле с толщиной стенок 2 мм; \*\*\* – средние значения пористости отливок, полученных из газонасыщенного сплава

## Получение и обработка расплавов

товках, залитых в холодный кокиль из газонасыщенного переплавленного металла. Различие в скоростях затвердевания отливок цилиндров из газонасыщенного сплава на плотности заготовок не сказалось.

Таким образом, если рассматривать переплавляемую отливку в качестве чушки, большая пористость в ней способствовала получению более плотного конечного изделия, в данном случае – заготовки.

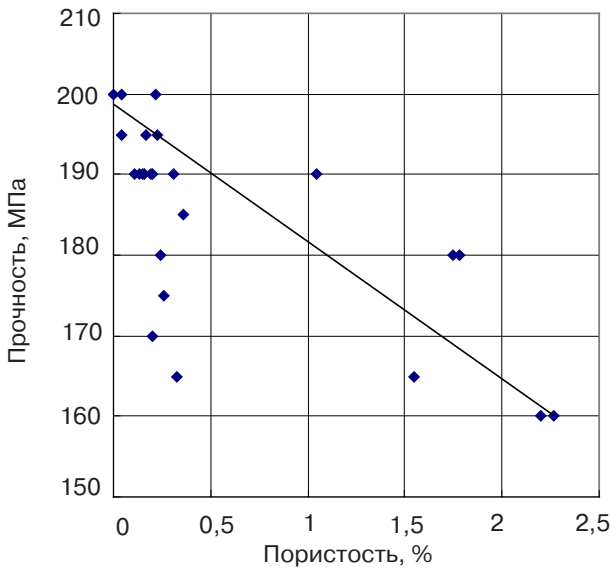


Рис. 1. Зависимость прочности образцов от величины пористости заготовок

на плотность металла, целесообразно рассмотреть связь величины пористости и прочности. Приведенная на рис. 1 зависимость позволяет сделать предположение, что каждой величине пористости заготовки соответствует определенное значение прочности. Отклонение положения опытных точек от этого значения можно объяснить наличием в данном образце поры большего размера, чем некий средний для данного образца, либо скоплением пор среднего размера в некотором сечении, то есть случайными причинами. Проявление этих случайных причин особенно сильно повлияло на положение четырех точек в левом нижнем углу диаграммы. Поэтому для повышения результативности анализа целесообразно рассмотреть несколько вариантов значений прочности в этих точках: в первом варианте величина прочности образцов, соответствующих этим точкам, была принята равной 190 МПа (это среднее значение прочности при данной величине пористости и соблюдении линейной зависимости, согласно рис. 1, между ними), второй вариант предполагал исключение выпадающих точек, кроме точки, отмеченной в табл. 2 (\*\*). Кроме того, значения прочности заготовок, полученных в холодном и горячем кокилях усреднены. Рассматриваемые варианты представлены в табл. 3. Здесь же, для удобства сравнения, приведены усредненные данные из табл. 2.

Судя по полученным данным, результат влияния газонасыщения и переплава во всех рассматриваемых вариантах одинаков, в частности:

- прочность заготовок из газонасыщенного расплава ниже, чем из исходного;
- прочность заготовок из газонасыщенного и переплавленного металла ниже, чем из переплавленного и неgasонасыщенного;
- прочность заготовок из газонасыщенного и переплавленного металла, полученного в токостенном кокиле, ниже, чем полученного в толстостенном;
- прочность заготовок из переплавленного исходного металла выше, чем из исходного.

Именно в последнем случае и проявился эффект водородного рафинирования относительно прочностных свойств.

Общеизвестна связь между прочностью и плотностью литого металла. В ранее проведенных исследованиях [7] отмечается линейная зависимость, имеющая место и в данном случае, рис. 1 (использованы данные по всем заготовкам, полученным в эксперименте). В табл. 2 приведена прочность заготовок, полученных на различных этапах эксперимента.

Анализируя изменение прочности заготовок в зависимости от газонасыщенности расплава и температуры кокиля, можно отметить, что оба эти фактора уменьшают прочность, в результате же переплава она возрастает. Поскольку эти же факторы таким же образом влияют и на

**Таблица 2. Прочность заготовок, полученных на различных этапах эксперимента**

Температура кокиля, °С	Первый этап		Второй этап			
	А		Б		В	
	15-20	275-295	15-20	275-295	15-20	275-295
	прочность, МПа					
Исходный расплав	165**	185	200	190	190	195
Длительность выдержки, мин:						
3	180	160	195	190	190	180*
30	180	160	195	170*	200	190
90	190	165	200	190	190	175*
Среднее***	183,3	161,7	196,7	183,3	193,3	181,7

**Примечания:** А – заготовки отлиты параллельно с отливками цилиндров; Б – из переплавленных отливок цилиндров, полученных в кокиле с толщиной стенок 15 мм; В – из переплавленных отливок цилиндров, полученных в кокиле с толщиной стенок 2 мм; \* \*\* – значения прочности, отклоняющиеся от линейной зависимости; \*\*\* – средние значения прочности отливок, полученных из газонасыщенного сплава

**Таблица 3. Средние значения прочности заготовок, полученных в кокиле с температурами 15-20 и 275-295 °С**

Вид обработки расплава	Вариант коррекции	Первый этап	Второй этап	
		А	Б	В
		прочность, МПа		
Исходный расплав	без	175	195	192,5
Газонасыщенный расплав	коррекции	172,5	190	187,5
Исходный расплав	1, 2	187,5	195,0	192,5
Газонасыщенный расплав	1	172,5	193,3	191,4
	2		195,2	192,9

**Примечания:** А – заготовки отлиты параллельно с отливками цилиндров; Б – из переплавленных отливок цилиндров, полученных в кокиле с толщиной стенок 15 мм; В – из переплавленных отливок цилиндров, полученных в кокиле с толщиной стенок 2 мм

Как было показано выше, при переплаве отливки водород, содержащийся в порах, образует пузырьки в жидком сплаве, которые всплывают, унося неметаллические включения, сыгравшие роль зародышей поробразования при затвердевании отливки. Часть пузырьков водорода, поднявшихся на поверхность, лопаются, и водород переходит в атмосферу, часть остается на поверхности в слое окисной пленки как старой, имевшейся на поверхности отливки, так и новой, образовавшейся в результате окисления зеркала металла. Образовавшуюся на поверхности расплава оксидную пленку обычно снимают, удаляя вместе с ней не успевшие раствориться в металле пузырьки водорода и неметаллические включения. Таким образом, в условиях отсутствия длительной выдержки расплава и значительного перегрева содержание водорода и неметаллических включений в расплаве, полученного из переплавленной отливки, меньше, чем в исходной отливке. Этим объясняется зафиксированное в табл. 1 уменьшение пористости в 1,5 раза в заготовках из переплавленного исходного сплава, полученного в холодном кокиле (от 0,33 до 0,2 %). Уменьшение пористости заготовок, полученных в горячем кокиле, не столь заметно, но, несмотря на это, сказалось на величине прочности. Можно отметить, что проч-



ность образцов из переплавленного исходного сплава выше, чем прочность соответствующих образцов из исходного сплава, полученных в равных условиях (табл. 2), а их средняя прочность самая высокая в данном эксперименте (табл. 3). Интересно, что пятикратное повышение пористости заготовок (от 0,33-0,36 до 1,53-2,0 %) в результате газонасыщения (табл. 1) вызвало непропорционально малое снижение прочности (от 175-187,5 до 172 МПа) по сравнению с отмеченным выше повышением прочности, вызванным снижением пористости при переплаве исходного сплава. Это можно объяснить, тем, что округлые поры газового происхождения, образующиеся при высоких содержаниях водорода, достигнутых газонасыщением расплава, меньше влияют на величину прочности, чем остроугольные газоусадочные поры, которые возникают при малых содержаниях водорода и служат концентраторами напряжений при разрушении образцов.

Тот интересный факт, что пористость заготовок, полученных из переплавленного газонасыщенного расплава, ниже, чем из переплавленного неgasонасыщенного, объясняется тем, что процесс ВР начинается уже при газонасыщении расплава. Как показано в работе [4], пересыщение водородного раствора в алюминиевом сплаве, возникающее при взаимодействии расплава с парами воды, приводит к образованию пузырька на неметаллических включениях, имеющихся в расплаве. Пузырьки всплывают и уносят НВ на поверхность расплава, откуда они удаляются вместе с оксидной пленкой перед заливкой отливки. Назовем это первой стадией процесса ВР.

При заливке расплава в форму происходит снижение его температуры и вновь создается пересыщение раствора водорода, образующиеся пузырьки всплывают и уносят включения в прибыль отливки. В этом состоит вторая стадия ВР. Чем больше содержание водорода перед заливкой, тем выше степень пересыщения и тем более мелкие включения будут удалены. Косвенным свидетельством протекания второй стадии ВР являются пузырьки, всплывающие в прибыльную часть отливки.

Часть водорода, оставшегося в затвердевающей отливке, начинает выделяться при переходе металла из жидкого состояния в твердое. Пузырьки, образовавшиеся при этом, могут всплывать, пока этому не будет препятствовать кристаллический каркас. В этот момент вторая стадия ВР заканчивается.

Пузырьки, формирующиеся после, образуют пористость отливки, объем которой зависит от количества оставшегося к этому времени в расплаве растворенного водорода, количества и размеров НВ, а также скорости затвердевания отливки.

Рассмотрим разницу между образованием пористости при одном и том же количестве водорода, оставшегося к моменту образования сплошного каркаса в двух случаях, когда прошла вторая стадия ВР и когда пузырькового газовойделения из расплава не было, тогда в первом случае в качестве зародышей порообразования будут задействованы более мелкие НВ, чем во втором, поскольку крупные НВ удалились из расплава на второй стадии. Во втором случае этого не было, и зародышами порообразования становятся крупные НВ. Поэтому при последующем переплаве в первом случае произойдет очистка расплава от более мелких НВ, чем во втором, то есть степень очистки расплава от НВ в первом случае будет выше. И чем больше было содержание водорода перед началом второй стадии, то есть, чем более эффективно она прошла, тем более мелкие НВ будут удалены при переплаве. Именно в этом и заключается не сразу понимаемая роль второй стадии ВР.

Удаление из расплава пузырьков и НВ при переплаве пористой отливки назовем третьей стадией ВР. Это удаление НВ приводит к тому, что даже при большем содержании водорода в переплавляемом газонасыщенном сплаве, чем в переплавляемом неgasонасыщенном, содержание НВ в первом меньше, и общий объем пористости при затвердевании отливки меньше. Так, в условиях эксперимента в зависимости от скорости затвердевания величина пористости составляет 0,08 % для заготовки из газонасыщенного сплава, полученной в холодном кокиле, и 0,18-0,22 % - в горячем, тогда как пористость заготовок из переплавленного исходного расплава в тех же условиях составляет 0,20-0,22 и 0,22-0,31 % (см. табл. 1).

Итак, третья стадия ВР имеет место при переплаве любых отливок, имеющих поры, вне зависимости от того, были ли до этого предыдущие стадии ВР. Однако эффективность третьей стадии ВР определяется наличием предыдущих.

Таким образом установлено, что в условиях лабораторного эксперимента ВР привело к повышению плотности и прочности литого металла. Нет сомнений, что на полученные результаты оказала влияние и неизвестная предыстория использованного для опытов металла: вероятно, эффективность ВР при каждом последующем ее цикле снижается.

Для выяснения практической ценности эффекта ВР были проведены эксперименты в производственных условиях на специализированном металлургическом предприятии АДМ (г. Киев) при изготовлении вторичного сплава АК7. Согласно существующей на заводе технологии, лом переплавляют в печах сопротивления с графито-карбидокремниевым глазурированным тиглем емкостью 350 кг. После наплавления в тигле достаточного количества расплава и доведения его химического состава до требований ДСТУ производят обработку образовавшегося шлака флюсом, уменьшающим содержание металла в шлаке и очищающим расплав от неметаллических включений. В данной серии экспериментов эффект, достигаемый от ВР, сравнили с эффектом от рафинирования расплава специальными дегазирующими препаратами (препарат Degasal T200 производства «CHAFFER», Германия; дегазирующий препарат производства «Эвтектика», Беларусь) и продувкой расплава азотом. Препараты вводили колокольчиком, согласно инструкции производителя, причем для повышения эффективности действия увеличили рекомендованную минимальную дозу в 2 раза, до 0,2 % от массы расплава.

Газонасыщение расплава обработкой водяным паром осуществляли погружением под уровень расплава колокольчика, заполненного влажной минеральной ватой, продувку расплава производили с помощью крестообразного газораспределителя (длительность продувки – 5 мин, расход азота – 1,85 м<sup>3</sup>/т расплава).

Эффективность различных методов обработки расплава оценивалась сравнением прочностных свойств исходного сплава (пробы отбирались после доведения состава сплава до требуемого), сплава после той или иной обработки (продувка азотом, газонасыщение или обработка дегазирующим препаратом) и тех же сплавов, но разлитых в чушку и вновь расплавленных. Вид обработки расплава, температура отбора проб и содержание водорода в расплаве, определенные на анализаторе водорода RHEN-602 фирмы LECO, приведены в табл. 4. Там же указаны прочностные свойства сплава и балл пористости чушек, полученных из исходного и обработанного расплава, определенный по стандартной методике, и дополнительно определенная суммарная площадь пор на 1 см<sup>2</sup> в зонах, где измерялся балл пористости.

Для исследования прочностных свойств сплава в данном эксперименте использовались описанные выше заготовки и предусмотренная ГОСТом 1583-93 (ДСТУ 2839-94) стандартная литая заготовка, представляющая собой расположенный горизонтально цилиндр длиной 230 мм и диаметром 20 мм с прибылью вдоль всей образующей цилиндра. Из отливки изготавливался образец № 15 (ГОСТ 1497-61), диаметр рабочей части – 10 мм. Все заливки производились в холодные кокили. Полученные данные усреднялись. Прочностные свойства отливок, полученных непосредственно из расплава и переплавленных чушек, приведены в табл. 4.

Для оценки величины газосодержания расплава и характера распределения пористости по высоте отливки использовалась специальная технологическая проба [7]. Отливка (кокиль для ее получения показан на рис. 2) представляет собой поставленный на ребро клин с хорошим питанием, фиксируемая пористость имеет газовое происхождение. Плотность литого сплава в различных частях пробы определяется по образцам, вырезаемым из соответствующих частей: после отрезки прибыли вместе с подприбыльной частью с одной стороны и вертикального слоя 25 мм, расположенного в зоне торцевого эффекта, со стороны, противоположной прибыли, где газовыделение меньше из-за ускоренного затвердевания, отливка

Таблица 4. Вид и температура обработки расплава, содержание водорода в нем, прочность, пластичность образцов, балл пористости чушек и суммарная площадь пор на 1 см<sup>2</sup>

Номер эксперимента	Вид обработки расплава	Номер образца	Отливки, полученные из расплава		Отливки, полученные из переплавленных чушек		Температура расплава T, °C	Содержание водорода см <sup>3</sup> /100 г	Относительная площадь пор мм <sup>2</sup> /см <sup>2</sup>	Балл пористости
			σ, МПа	δ, %	σ, МПа	δ, %				
1	исходный расплав	1	183	3,9	191	4,7	835	0,63	0,26	5
	дег Т200*	111	185	7,3	184	5,1	740	0,39	0,05	3
2	исходный расплав	2	182	4,6	-	-	776	0,64	-	-
	дегазал «Эвтектика» **	22	183	5,0	194	4,7	812	0,58	0,35	3
4	исходный расплав	4	193	4,1	185	6,7	763	0,51	0,49	5
	продувка азотом	44	213	6,5	195	4,5	775	0,31	0,04	2
5	исходный расплав	5	187	3,8	191	4,5	773	0,60	0,11	3
	газонасыщение	55	190	4,5	203	4,7	792	0,81	0,15	3
6	исходный расплав	6	190	3,2	194	4,4	766	0,61	0,07	3
	дег Т200*	66	187	4,4	201	3,2	801	0,90	0,94	5

\*расплав обработан препаратом Degasal T200 производства «CHAFFER», Германия;

\*\*расплав обработан дегазирующим препаратом производства «Эвтектика», Беларусь



разделяется горизонтальными резами на три части (верхняя, средняя и нижняя), толщина полученных образцов составляет 12 мм. Плотность образцов определялась методом гидростатического взвешивания. Величина относительной пористости рассчитывалась с учетом максимальной плотности образца, зафиксированной в данном эксперименте. Распределение пористости по высоте образцов в зависимости от вида обработки расплав и последующего переplava чушки представлено на рис 3.

Анализируя влияние вида обработки на прочность образцов из исходного расплава, можно отметить, что все виды обработки, кроме продувки азотом (которая повысила прочность с 193 до 213 МПа, то есть на 5 %), на прочность практически не повлияли, изменения укладываются в  $\pm 1,5\%$ . Пластичность же увеличилась во всех случаях, табл. 4.

Переplav исходного расплава повысил прочность образцов № 5 и 6 на 2 %, №1 – на 4 %, уменьшил на 5 % прочность образца № 4.

Переplav обработанного расплава повысил на 5-6 % прочность образцов № 22, 55 и 66, не повлиял на образец № 111 и на 9 % уменьшил прочность образца № 44.

Таким образом, судя по результатам эксперимента, на прочность образцов из исходного расплава положительное влияние оказала лишь продувка расплава азотом, пластичность же выросла как в случае дегазирования расплава продувкой азота и дегазирующими препаратами, так и в результате газонасыщения расплава. Интересен также факт повышения прочности и пластичности переplавленного сплава относительно исходного, обработанного как газонасыщением, так и дегазирующими препаратами. Кажется странным, что и отмеченное выше повышение прочности исходного сплава после переplava, зафиксированное на образце № 1 (табл. 4), устраняется после обработки расплава препаратом Дегазал Т200 (образцы № 1 и 111), в то время как использование этого же препарата при получении образца № 66 привело к повышению прочности на 6 %.

Для разрешения этих вопросов следует обратиться к данным по температуре расплава и содержанию водорода в нем, табл. 4. Общеизвестно, что повышение температуры расплава увеличивает его газосодержание, что происходит и в данном случае. Исключением является уменьшение содержания водорода при росте температуры расплава, отмеченное при его продувке азотом, благодаря рафинирующему действию этого вида обработки (образцы № 4 и 44). В остальных же случаях, вне зависимости от вида используемой обработки расплава (дегазирования или газонасыщения), происходит одновременное повышение температуры расплава и содержания водорода. Это позволяет сделать предположение, что зафиксированное в экспериментах повышение прочностных свойств после переplava чушек,

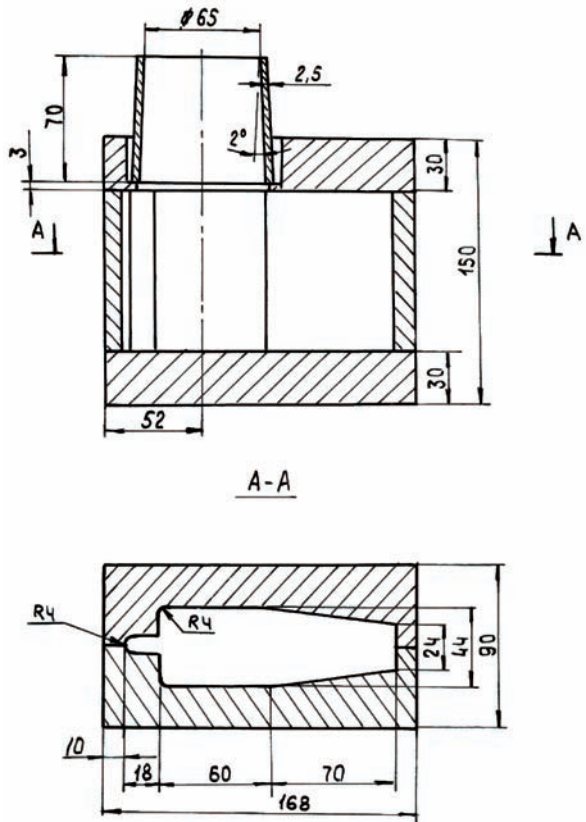


Рис. 2. Кокиль для пробы на распределение пористости по высоте отливки

## Получение и обработка расплавов

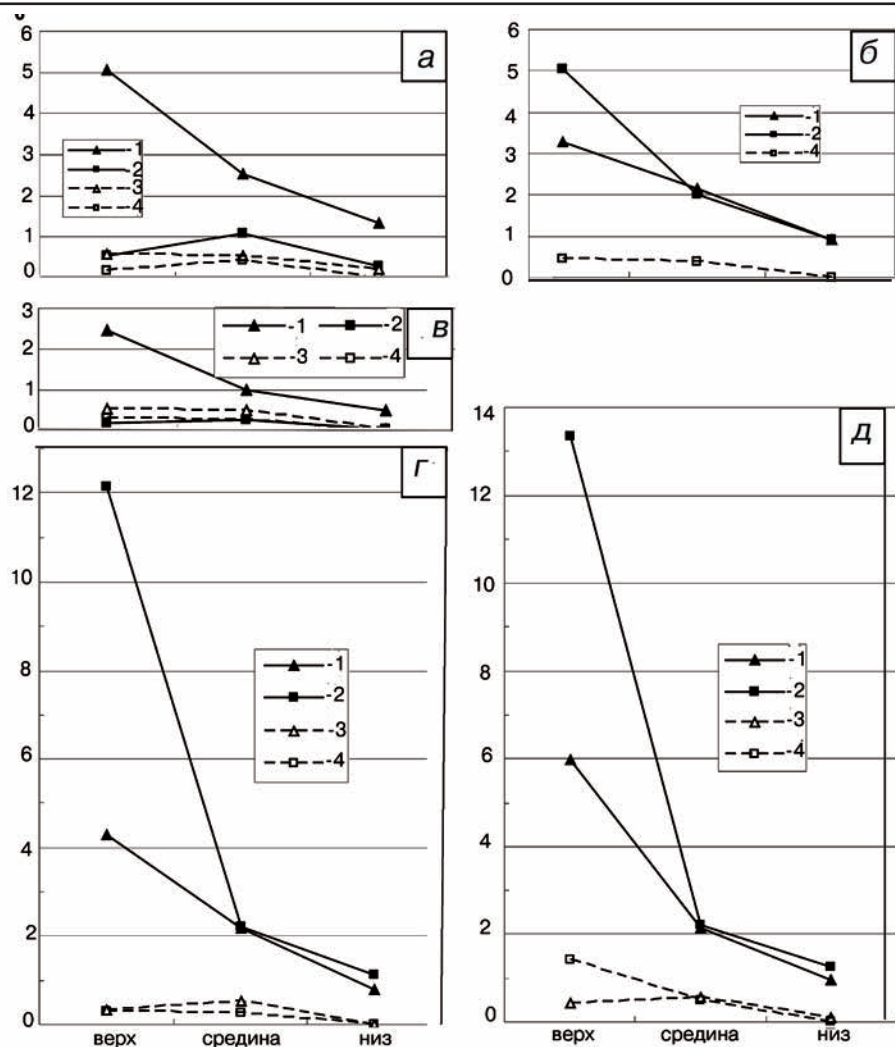


Рис. 3. Влияние вида обработки расплава и последующего переплава полученной чушки на величину пористости в верхней, средней и нижней частях пробы; вид обработки: а, д – препарат Degasal T200 производства «CHAFFER», б – дегазирующий препарат производства «Эвтектика», в – продувка азотом; г – газонасыщение; 1, 2 – до переплава, 3, 4 – после переплава, 1, 3 – исходный расплав, 2, 4 – расплав после обработки

полученных из расплава, обработанного как газонасыщением, так и при использовании дегазирующих препаратов, вызвано водородным рафинированием расплава, эффект которого, как показали описанные выше эксперименты, увеличивается с ростом содержания водорода в расплаве. Очевидно, в условиях эксперимента влияние температуры как фактора, увеличивающего содержание водорода, оказалось сильнее, чем дегазирующее действие препаратов.

Судя по характеру распределения пористости по высоте отливки, исследованном на специальной технологической пробе, с ростом температуры расплава содержание водорода в нем повышается (табл. 4), что и вызывает рост пористости в верхней части отливки (на рис. 3, б, д левые части кривых 2 значительно выше левых частей кривых 1). Следует отметить, что разница в содержании водорода образцов № 2 и 22 невелика, а величина пористости в верхней части отливки после обработки дегазирующим препаратом существенно возросла. Косвенным свидетельством высокого содержания водорода в обработанном расплаве явилось наличие всплывающих

пузырьков водорода в прибылях отливок и на поверхности чушек. Отсутствовали эти пузырьки лишь после продувки расплава азотом. Уменьшение же содержания водорода, зафиксированное в эксперименте 1 (табл. 4) после использования препарата Degasal T200, и соответствующее ему положение кривых 1 и 2 на рис. 3, а вызвано снижением температуры расплава в процессе выдержки.

Если по интенсивности всплывания пузырьков в процессе затвердевания сплава, хорошо заметному на открытой прибыльной части отливки или на поверхности чушки, можно судить о протекании второй стадии ВР, то характер распределения пористости по высоте отливки дает об этом более полное представление.

Разница в величине пористости верхней и нижней частей отливки вызвана всплыванием пузырьков водорода, она тем больше, чем полнее прошла вторая стадия ВР. По разнице пористости средней и нижней частей можно судить о количестве водорода, который остался в расплаве и выделился после образования сплошного кристаллического каркаса, препятствующего всплыванию пузырьков.

Анализируя распределение пористости по высоте отливки в зависимости от вида обработки расплава и последующего переплава, можно отметить, что вторая стадия ВР имела место во всех случаях: максимальная пористость в верхней части отливки, минимальная – в нижней (рис. 3, кривые 1 и 2, слева), переплав значительно сократил разницу в пористости нижней и верхней частей пробы. Степень же развития второй стадии ВР во всех случаях, кроме обработки расплава азотом, связана с температурой отбора пробы (см. табл. 4 и рис. 3, а-д, кривые 1 и 2) и каждый раз различна.

Между тем, попытка корреляции температуры расплава и содержания водорода в нем оказалась неудачной (рис. 4). В правой части диаграммы отдельно расположены точки, выпадающие из просматриваемой линейной зависимости. Это говорит о том, что содержание водорода в расплаве, полученном при переплаве лома, зависит, кроме температуры, и от таких неучитываемых факторов, как степень загрязненности шихты и длительность выдержки расплава при данной температуре. В то же время зависимость величины пористости верхней части пробы от содержания водорода (рис. 5), построенная по соответствующим данным из табл. 4, довольно четкая, что, во-первых, подтверждает причину разницы пористости верхних частей проб, а во-вторых, при наличии соответствующей статистики может быть использована для экспресс определения содержания водорода в расплаве.

Тот факт, что большей пористости верхней части пробы из исходного или обработанного расплава соответствует и более высокая прочность после переплава, говорит о том, что причиной увеличения прочностных свойств сплава является ВР.

Так, в экспериментах 2, 5, 6, (табл. 4) зафиксирована более высокая прочность переплавленного обработанного сплава

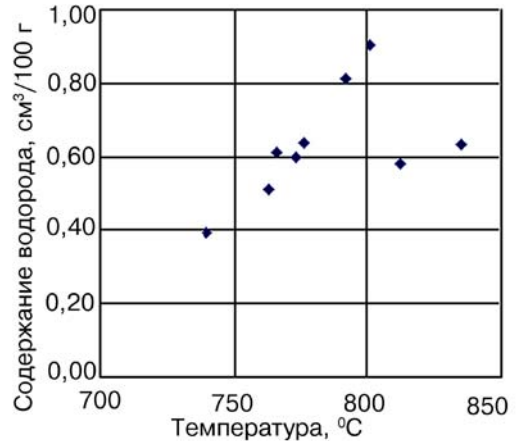


Рис. 4. Зависимость содержания водорода от температуры расплава

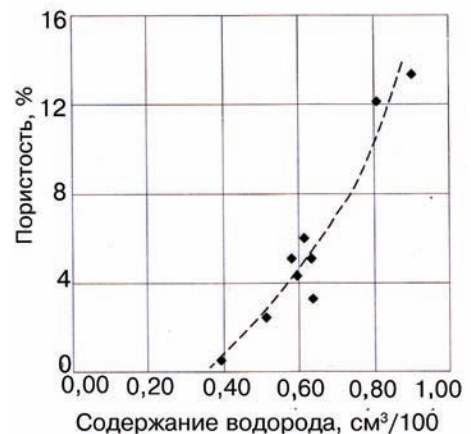


Рис. 5. Зависимость величины пористости верхней части пробы от содержания водорода в расплаве

## Получение и обработка расплавов

по сравнению с исходным и обработанным, и величина пористости верхней части пробы также выше (левая часть кривых 2 на рис. 3 выше соответствующих кривых 1). В том случае, когда пористость верхней части отливки и содержание водорода выше до обработки (рис. 3, а), то прочность после переплава тоже выше (табл. 4, образцы 1 и 111).

Таким образом, судя по данным табл. 4, большему содержанию водорода в расплаве соответствует большая величина пористости в верхней части пробы (рис. 3), и прочность сплава после переплава соответствующих чушек также выше, что и подтверждает предположение о роли ВР как положительного фактора повышения свойств.

Как было показано выше, судя по пузырькам в прибылях отливок и чушек, вторая стадия ВР в условиях эксперимента имела место во всех случаях, но степень ее развития была различной, что и сказалось на свойствах сплава. Здесь же следует отметить, что температура 763 °С, при которой отбирали пробы из исходного расплава, предназначенного для продувки азотом, достигнута в результате 2-часового нагрева уже готового расплава от 718 °С. При этом не происходило обычное для процесса плавки поглощение водорода из шихты, поскольку шихта не подгружалась. Этим объясняется меньшее, чем во всех остальных случаях выделение пузырьков в прибыльной части отливок, а значит – и пониженная эффективность ВР, сказавшаяся на прочностных свойствах. Интересно, что содержание водорода в расплаве, обработанного азотом ( $0,31 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ), при котором отсутствуют пузырьки в прибылях отливок и чушках, близко к значению содержания водорода, при котором отсутствует пористость в верхней части пробы, рис. 5.

Естественным выражением влияния температуры расплава и связанного с ней содержания водорода является балл пористости чушек. Так, повышение температуры расплава (табл. 4, эксперимент № 6) вызвало его увеличение с 3 до 5, а при понижении температуры расплава в эксперименте № 1 снизились и газо-

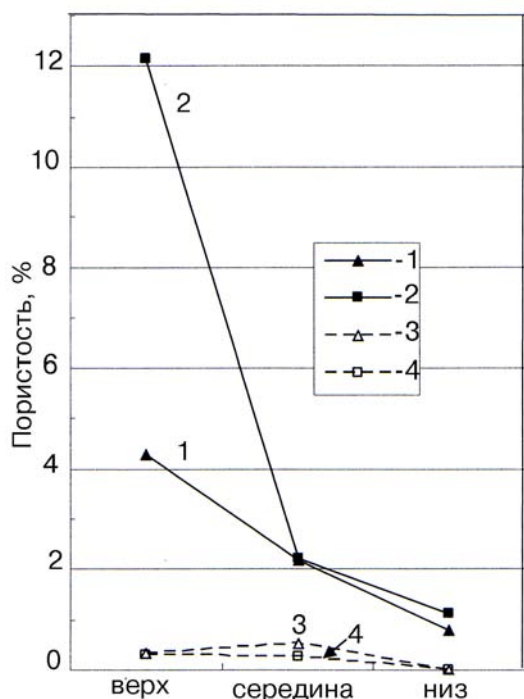


Рис. 6. Влияние обработки расплава влажной минеральной ватой и последующего переплава полученной чушки на величину пористости в верхней, средней и нижней частях пробы: 1, 2 – до переплава, 3, 4 – после переплава; 1, 3 – исходный расплав; 2, 4 – обработка расплава влажной минеральной ватой

содержание, и балл пористости с 5 до 3. Газонасыщение расплава не увеличило зафиксированный балл пористости чушки, но содержание водорода возросло с 0,6 до  $0,81 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , суммарная площадь пор на  $1 \text{ см}^2$  увеличилась почти в 1,5 раза, значительно увеличилась и пористость в верхней части пробы, рис. 6. Это говорит о том, что оценка качества расплава, прошедшего ВР только по показателю «балл пористости чушки», может быть ошибочной. Интересно также, что и традиционная оценка качества сплава по баллу пористости потребителем сплава не приемлема, если его производитель в ходе изготовления сплава использует процесс ВР: при переплаве чушек, балл пористости которых был равен 5 (эксперименты 1 и 6), получены образцы с более высокой прочностью, чем из соответствующих чушек с баллом пористости 3. В то же время при использовании традиционного рафинирования азотом (эксперимент 4) зависимость между величиной балла пористости чушки и прочностью сплава – также традиционная.

Следует отметить, что при переплаве рафинированного азотом сплава прочность и плотность сплава снизились.

Таким образом, установлено следующее:

– при производстве вторичных алюминиевых сплавов могут сложиться условия, при которых возникает процесс ВР, состоящий в очистке расплава от НВ и водорода, что происходит при всплывании пузырьков вместе с НВ, на котором они образовались, на поверхность расплава, благодаря чему повышаются плотность литого металла и его прочность;

– процесс ВР можно разбить на три стадии: первая происходит при газонасыщении расплава продувкой парами воды, вторая – при снижении температуры расплава, залитого в чушку, третья – при переплаве чушки;

– влияние ВР на прочность и плотность сплава тем ощутимей, чем активнее проходит вторая стадия ВР (то есть чем выше содержание водорода в расплаве перед началом второй стадии, о чем можно судить по величине пористости верхней части специальной пробы) при обязательном наличии третьей стадии;

– при использовании расплава непосредственно для изготовления изделий, минуя процесс получения чушек (то есть без третьей стадии ВР), хорошие результаты достигаются путем рафинирования расплава продувкой азотом;

– положительные результаты, получаемые при рафинировании азотом перед заливкой расплава в чушку, могут быть частично утрачены после переплава чушки;

– эффективность используемых методов рафинирования можно оценить с помощью описанной специальной технологической пробы.

В заключение следует отметить, что такие технологические параметры ВР, как необходимость в газонасыщении и его продолжительность, а также температура расплава при заливке изложниц, определяются как особенностями технологии плавки на данном предприятии, видом используемой шихты, так и составом сплава, в частности, шириной двухфазной зоны.



### Список литературы

1. Факторы эффективности водородной обработки силуминовых расплавов / Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов, В. И. Белик и др. // Процессы литья. – 2005. – № 2. – С. 61-69.
2. Термовременная обработка алюминиевых сплавов в магнитодинамической установке МДН-6А / В. И. Белик, Ф. М. Котлярский, В. Н. Фикссен и др. // Там же. – 2006. – № 4. – С. 53 – 58.
3. Влияние водородной обработки силуминовых расплавов на механические свойства отливок / Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов, В. И. Белик и др. // Там же. – 2004. № 2. – С. 56-61.
4. Взаимодействие неметаллических включений с газами в пересыщенных расплавах / Ф. М. Котлярский, В. И. Белик, В. П. Абрамова и др. // Там же. – 1992.– № 1. – С. 77-86.
5. Водородное рафинирование алюминиевых сплавов от твердых неметаллических включений / Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов, В. И. Белик и др. // Там же. – 2008. – № 4 – С. 48-55.
6. Выбор литой заготовки для исследования прочностных свойств алюминиевых сплавов / В. И. Белик, Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов и др. // Там же. – 2009. – № 2. – С. 17-24.
7. Литье вторичного сплава АК9 в двухфазном состоянии с предварительным наводораживанием и модифицированием стронцием / Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов, В. И. Белик и др. // Там же. – 2010. – № 1. – С. 17-27.
8. Котлярский Ф. М, Белик В. И. Предпосылки совершенствования технологической пробы для оценки газонасыщенности алюминиевых сплавов // Там же. – №1. – 2009. – № 2. – С. 17-27.

Поступила 22.02.2010