Научный редактор раздела
докт. техн. наук, профессор И.С. Полькин

УДК 669.715:621.74

АКУСТИЧЕСКАЯ КАВИТАЦИЯ – ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПРЕДЕЛЬНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВНЕПЕЧНОМ МОДИФИЦИРОВАНИИ РАСПЛАВА

С.Г. Бочвар, *канд. техн. наук,* ***Г.И. Эскин,*** *докт. техн. наук*
(ОАО ВИЛС, e-mail:info@oaovils.ru)

Проведен анализ воздействия акустической кавитации на расплав. Предложена схема разрушения агломератов дисперсных частиц зародышевого действия в поле акустической кавитации.

Определено, что в процессе захлопывания кавитационных пузырьков возникают давления гидравлических импульсов до 500 МПа и скорости микротечений до 100 м/с, этого оказывается достаточно для разрушения скоплений дисперсных частиц.

Предложенная схема экспериментально подтверждена при кавитационном воздействии на поток расплава стандартного лигатурного прутка состава Al–3 % Ti–1 % B.

Показано, что при внепечном модифицировании с кавитационным воздействием на расплав вместо дендритной структуры слитка из сплава типа 1960 формируется недендритная структура и размер зерна уменьшается более чем в 3 раза.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, акустическая кавитация, недендритная структура, внепечное модифицирование, агломераты дисперсных частиц.

Acoustic Cavitation is an Efficient Technique of Ultimate Grain Refinement in Aluminium Alloys in the Case of Out-of-Furnace Melt Treatment. S.G. Bochvar, G.I. Eskin.

The effects of acoustic cavitation on melt are analysed. A mechanism of breaking-up of fine nucleating particle agglomerates in an acoustic cavitation field is suggested.

It is found that the collapse of cavitation bubbles produces hydraulic pulses of up to 500 MPa and microjets with velocities of up to 100 m/sec, that is sufficient for dispersing of the nucleating particle agglomerates.

The suggested mechanism is verified experimentally during cavitation processing in the melt flow of a molten standard Al–3 % Ti–1 % B master alloy.

It is demonstrated that the out-of-furnace melt cavitation processing results in formation of a nondendritic structure in a 1960-type alloy billet and in 3-fold grain refinement.

Key words: ultrasonic treatment, acoustic cavitation, nondendritic structure, out-of-furnace processing, fine particle agglomerates.

Известно, что дисперсные частицы зародышей кристаллизации, такие как, например, диборид или карбиды титана размером ≤2 мкм, в стандартных лигатурных прутках систем Al–Ti–B и Al–Ti–C, как правило, находятся в агломерированном состоянии в виде относительно крупных скоплений размером до 30 мкм. В процессе непрерывного

литья слитков алюминиевых сплавов растворяемый в потоке расплава лигатурный пруток из-за присутствия таких агломератов теряет свои модифицирующие свойства, так как большая часть агломерированных частиц задерживается в фильтрующих и рафинирующих устройствах. По существу, в кристаллизующийся слиток доходит только небольшая часть зародышевых частиц.

Следует отметить, что частицы в агломератах в зависимости от их размеров держатся вместе как за счет сил адгезии и капиллярных сил, так и силами Ван-дер-Ваальса. По результатам зарубежных исследований (рис. 1) [1], для частиц размером 1–3 мкм прочность этих связей невелика, и агломераты можно разрушить при наложении внешнего воздействия.

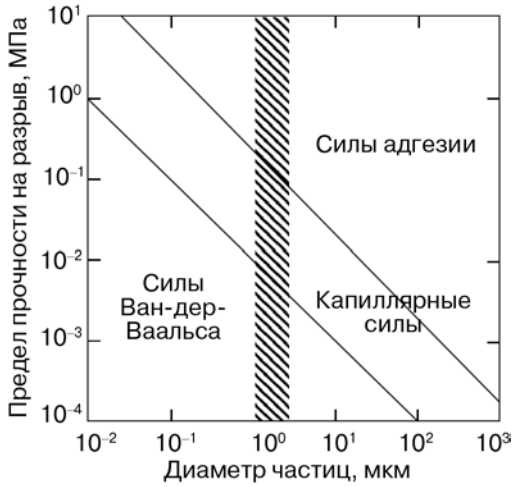


Рис. 1. Влияние размера частиц на условия их удержания в агломерате

Поэтому разработка эффективных методов разрушения агломератов и повышения активности модифицирующих прутков является актуальной научной и практической задачей.

Один из новых методов разрушения агломератов дисперсных частиц – кавитационное воздействие.

Дело в том, что при схлопывании (коллапсе) кавитационных пузырьков создаются условия для исключительно высоких перепадов давления и высокоскоростных микротечений. При этих условиях реализуются уникальные возможности для разрушения агломератов дисперсных частиц.

Для обсуждения этой проблемы рассмотрим феномен акустической кавитации, связанный с динамикой кавитационного пузырька [2].

Динамика кавитационного пузырька

Ультразвуковое воздействие определенной интенсивности на жидкость (расплав) и соответственно действие переменных давлений распространяющейся звуковой волны в местах неоднородностей (газовые пузырьки, взвешенные твердые частицы и их агломераты) вызывают разрыв этой жидкости в полупериоде растяжения. В месте разрыва образуется кавитационный пузырек, который на следующем полупериоде сжатия резко захлопывается.

По расчетам, при развитии кавитации в воде на частотах 18–20 кГц продолжительность одного периода составляет 50–56·10^{-6} с. На рис. 2 показано развитие кавитационного пузырька в течение одного периода колебаний [2].

Хорошо видно, что расширение пузырька происходит медленно из-за сопротивления внешнего статического давления и действия поверхностного натяжения. Процесс сжатия,

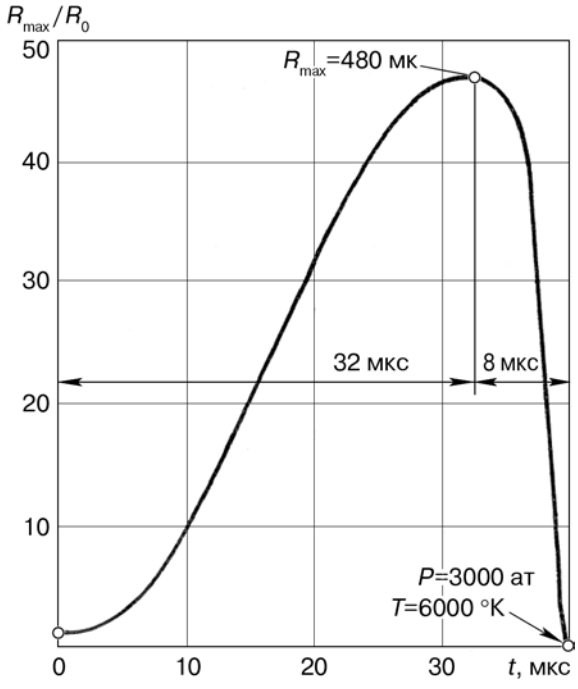


Рис. 2. Развитие кавитационной полости во времени (частота 20 кГц, период колебаний 50·10^{-6} с) [2]

и в особенности его конечная стадия, совершается в короткое время, так как внешние силы и звуковое давление действуют в одном направлении.

При захлопывании парогазовая смесь внутри пузырька размером R_{max} адиабатически сжимается до высоких давлений p_{max}, которые можно представить в виде уравнения

$$p_{max} = \frac{3}{2}\dot{R}_{max}\rho\gamma^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \qquad (1)$$

где $\dot{R}_{max}$ – максимальная скорость, достигнутая в стадии захлопывания, м/с;

γ – показатель политропы;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3.

Для воды при $\gamma=\frac{3}{4}$ и ρ=1000 кг/м^3 максимальная скорость была вычислена при решении уравнений динамики кавитационных пузырьков на аналоговом вычислительном устройстве и составила 250 м/с.

Подставляя указанное значение в представленное выше уравнение можно подсчитать, что давление газа в пузырьке достигает 3000 ат, или 300 МПа. Именно такие значения давлений определяют величину импульсов давлений, формируемых при захлопывании пузырька.

Аналогичные расчеты [2] показали, что в момент схлопывания температура достигает ≈6000 °К.

В работе [3] сделаны аналитические расчеты по оценке величины давления в ударной волне для кавитации в ряде жидких легкоплавких металлов (табл. 1).

Как следует из анализа табл.1, давление ударной волны зависит от плотности жидкости, в которой развивается кавитация. Поэтому если для воды эта величина составляет 300 МПа, а для тяжелых металлов – от 650 до 1160 МПа, то давление в расплаве алюминия можно оценить приблизительно равным 400–500 МПа.

Отметим особо, что при акустической кавитации происходит своеобразная трансформация акустической энергии. Энергия, накопленная кавитационным пузырьком в течение большей части периода колебаний, выделяется за малую долю периода в конечной стадии захлопывания.

Как установлено при исследованиях [4], при захлопывании пузырька происходит также образование мощных микропотоков типа кумулятивных струй. Возникновение этих струй связано с отклонением поверхности пузырька от сферической формы. Развитие каждого кавитационного пузырька идет не изолированно, а во взаимодействии с другими пузырьками, на близких расстояниях. В ряде случаев из-за близости стенки и наличия градиентов давления происходит общая деформация формы пузырьков и их сплющивание. В мощных ультразвуковых полях вихревые движения жидкости создают растягивающие напряжения, которые способствуют также искривлению поверхности пузырьков и образованию углублений или впадин.

В конечной стадии захлопывания кавитационного пузырька жидкость проникает в образовавшиеся углубления в виде микроструй и пронизывает пузырек со скоростью от сотен до нескольких тысяч метров в секунду.

На рис. 3 показаны стадии формирования кумулятивных струй в процессе динамики кавитационного пузырька.

Таблица 1

Давление ударной волны для ряда жидких легкоплавких металлов

Металл	Плотность, $\times 10^3$, кг/м^3	Давление, МПа
Олово	7,8	1160
Висмут	9,8	1070
Кадмий	8,65	987
Свинец	11,3	950
Индий	7,28	650

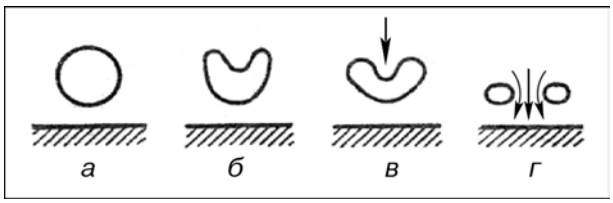


Рис. 3. К условиям образования кумулятивных микроструй жидкости [4]:

а – исходный сферический пузырек; *б* – сплющивание со стороны высокого давления; *в* – образование углубления; *г* – возникновение высокоскоростных микроструй жидкости

Ударное действие микроструй наряду с указанными выше импульсами гидравлических давлений позволяет реализовать самые разные эффекты кавитационного воздействия: разрушение (эрозия) поверхности твердых тел, звукокапиллярный эффект и пропитка капиллярно-пористых тел и др. В работах [5, 6] этот эффект был также использован для разрушения агломератов наночастиц в полимерной среде.

Кавитационная область. Для понимания технологических аспектов применения акустической кавитации следует обратить внимание на то, что в реальности вблизи источника мощного ультразвука возникает кавитационная область, представляющая собой скопление кавитационных пузырьков.

Расстояние между пузырьками в кавитационной области определяется числом пузырьков в единичном объеме и составляет 10^6–10^7 см$^{-3}$ в области развитой кавитации. Это в 10^5 раз превышает число зародышей кавитации в объеме жидкости (до 10^2 см$^{-3}$). Размножение пузырьков происходит почти мгновенно по цепной реакции, так как при захлопывании кавитационный пузырек теряет устойчивость и распадается на новые зародыши кавитации, которые, в свою очередь, также быстро распадаются на «осколки» новых зародышей кавитации.

Л.Д. Розенберг [7] предложил оценивать степень развития кавитации в виде индекса K:

$$K=\Delta V/V, \qquad (2)$$

где ΔV – суммарный объем пузырьков в фазе их максимального расширения;

V – объем жидкости, намного больший размеров кавитационных полостей.

При $K \le 0{,}3$, что обычно имеет место на практике, можно с полным основанием использовать закономерности, полученные для одиночного кавитационного пузырька при рассмотрении кавитационной области.

Критерий кавитационной активности. Возникающие в результате захлопывания кавитационных пузырьков процессы локального повышения импульсов давления, высоких температур и скоростных микропотоков определяют эффективность воздействия акустической кавитации на технологические процессы в жидкости (расплаве).

Как правило, для оценки интенсивности кавитации прибегают к определению степени разрушения твердых тел. Однако этот метод имеет ряд ограничений и далеко не всегда является универсальным. Например, его нельзя применить для большинства воздействий ультразвука на процессы в расплавах, таких как дегазация, фильтрование, модифицирование и др.

Попытки создать аналитически критерий эрозионной активности Z [2] на основе решения уравнений динамики кавитационной полости привели к следующим результатам (в качестве основы была принята разница в объеме полости за долю периода в стадии захлопывания Δt на частоте f):

$$Z=V_{max}/V_{min}\Delta tf, \qquad (3)$$

где V_{max} и V_{min} – соответственно объемы пузырька в стадиях расширения и захлопывания.

Для сферического пузырька критерий может быть записан в виде отношения

$$Z = R^3_{max}/R^3_{min}\Delta tf, \qquad (4)$$

где R_{max} и R_{min} – соответственно максимальный и минимальный радиусы полости.

Этот критерий является безразмерной величиной и характеризует трансформацию энергии в процессе расширения и захлопывания пузырька. Критерий можно рассчитать аналитически или путем приближенного решения уравнений динамики кавитационного пузырька [2].

Для пузырька с начальным радиусом $3{,}2\cdot10^{-6}$ м при звуковом давлении 1 МПа на частоте 20 кГц и давлении окружающей среды 1 ат (0,1 МПа) для жидкостей с различными физическими свойствами были рассчитаны значения критерия Z (табл. 2).

Анализ табличных данных свидетельствует о том, что критерий эрозионной активности мало зависит от поверхностного натяжения, вязкости и плотности жидкости, но на него сильно влияет содержание парогазовой смеси внутри пузырька.

Так, увеличение на порядок давления парогазовой составляющей в пузырьке снижает критерий на пять порядков.

По данным аналитических исследований динамики кавитационных пузырьков в рас-

Таблица 2

Критерий эрозионной активности в зависимости от физических свойств жидкости*

$\sigma \cdot 10^3$, н/м	$Z \cdot 10^{-6}$	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м^3	$Z \cdot 10^{-6}$	$\mu \cdot 10^{-3}$, МПа·с	$Z \cdot 10^{-6}$	$p_п \cdot 10^{-3}$, МПа	$Z \cdot 10^{-6}$
14,4	0,530	0,5	0,580	0,1	0,560	0,44	74,0
28,8	0,545	1,0	0,575	1,0	0,575	1,32	2,78
43,2	0,550	2,0	0,560	10	0,690	2,2	0,57
57,6	0,570	2,5	0,560	50	0,880	4,4	0,064
72,5	0,575	5,0	0,520	100	2,28	13,2	0,00076

* σ – поверхностное натяжение; ρ – плотность; μ – вязкость; $p_п$ – давление парогазовой смеси в пузырьке.

плаве алюминия [8], при кавитационной обработке было определено, что давление водорода в пузырьке радиусом 10^{-6} м существенно зависит от приложенного звукового давления (в расплаве алюминия и его сплавах растворен в основном водород). Чем выше звуковое давление, тем эффективнее растет пузырек в фазе расширения, и в режиме развитой кавитации он может увеличиваться в сотни раз.

В этих исследованиях [8] было также показано, что в зависимости от величины приложенного звукового давления (интенсивности ультразвуковой обработки) давление водорода внутри пульсирующего пузырька может заметно меняться из-за втекания газа в результате «выпрямленной» диффузии водорода. В тоже время давление водорода в пузырьке в фазе растяжения падает по мере увеличения интенсивности ультразвука.

Так, при малых значениях звукового давления (порядка 0,2 МПа), при которых кавитация только начинает развиваться, давление водорода в пузырьке уже составляет 10^{-3} МПа независимо от пульсаций пузырька. При повышении интенсивности ультразвуковой обработки и при значении звукового давления 1,0 МПа давление водорода в пузырьке снижается от 10^{-3} до $\approx 10^{-7}$ МПа. В режиме развитой кавитации при звуковом давлении 10 МПа давление водорода в пузырьке падает еще больше и может составлять 10^{-9} МПа.

Другими словами, в расплаве алюминия критерий эрозионной активности характеризуется значительной величиной и поэтому эффективность кавитационного воздействия на самые различные технологические процессы в расплаве алюминия и его сплавов достаточно велика.

К условиям разрушения в расплаве алюминия и его сплавов агломератов дисперсных зародышевых частиц под действием акустической кавитации

Как уже было сказано выше, анализ многочисленных исследований структуры лигатурных прутков зародышевого действия свидетельствует о том, что большая часть дисперсных частиц диборидов (или карбидов) титана размером ~1–3 мкм находится в агломерированном состоянии и при растворении прутков в потоке расплава частицы не разрушаются, а задерживаются по пути к кристаллизатору в рафинирующих и фильтрующих устройствах, что снижает модифицирующий эффект.

Наши исследования, а также данные других специалистов (см. например, [9]) подтверждают, что в структуре стандартных прутков наряду с отдельными частицами диборидов титана встречаются и крупные агломераты, а также крупные частицы алюминида титана. Совмещение процесса растворения прутка в потоке расплава с действием акустической кавитации создает благоприятные условия для разрушения агломератов и эффективного размножения неагломерированных зародышевых центров кристаллизации.

На рис. 4 показана возможная схема разрушения агломератов под действием акустической кавитации. Ультразвуковая обработка потока расплава определенной мощности и адсорбированный в микрорельефе частиц водород создают прекрасные условия

для образования у поверхности таких частиц кавитационных пузырьков. Эти пузырьки после нескольких пульсаций захлопываются с генерацией мощных гидроимпульсов и кумулятивных микропотоков, которые буквально разрывают агломераты на отдельные частицы, при этом каждая частица действует как самостоятельный зародышевый центр кристаллизации.

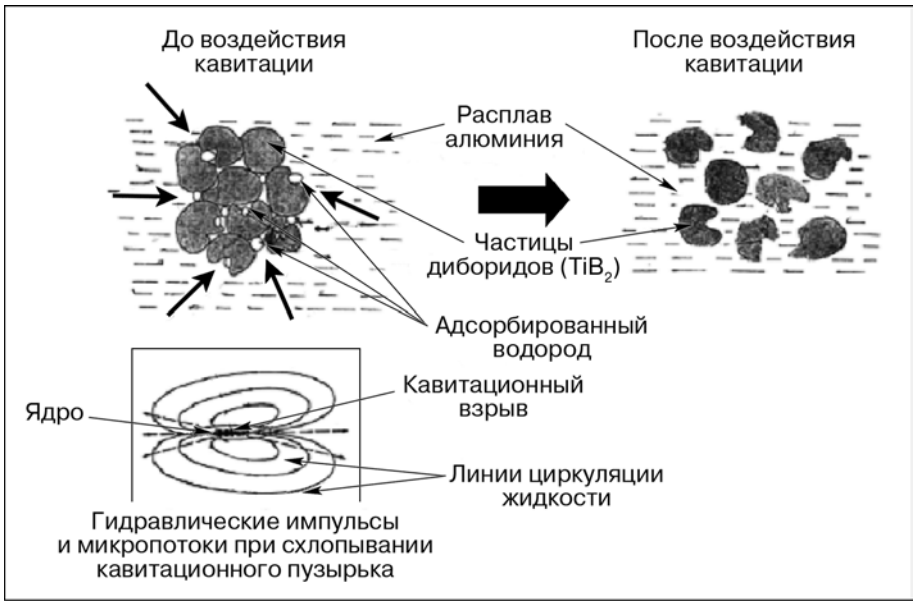


Рис. 4. Схема разрушения агломератов дисперсных частиц диборидов титана в расплаве алюминия и его сплавов под действием акустической кавитации

Растворение прутка в потоке расплава происходит, как правило, в поле множества кавитационных пузырьков, поэтому рассмотренная выше схема действует на все агломерированные частицы зародышеобразующих центров, что и позволяет говорить о повышении эффективности вводимого модификатора.

Экспериментально этот эффект можно проиллюстрировать при кавитационном воздействии на поток расплава стандартного лигатурного прутка состава Al–3 % Ti–1 % B.

Опыты проводили в лабораторных условиях*, когда расплав лигатурного прутка указанного состава разбавляли алюминием в соотношении: одна часть прутка к двум частям алюминия. Далее эксперимент ставили по двум технологическим схемам.

Первая заключалась в выдержке в термостате при температуре 800–820 °С в течение 10 мин и разливке в изложницу диаметром 10 мм как без кавитационной обработки, так и с применением акустической кавитации потока расплава.

По второй схеме расплав выдерживали в термостате при температуре 750–780 °С в течение 3 мин без кавитационной обработки и с применением кавитационного воздействия в течение всего времени выдержки. Далее полученный расплав охлаждали вместе с термостатом до затвердевания.

Дополнительно проводили эксперименты на лигатурном прутке без добавления алюминия. В этом случае применяли третью технологическую схему.

Такая схема предусматривала переплав лигатуры при температуре 780–800 °С с последующим охлаждением до температуры 720 °С и выдержкой при этой температуре в течение 2 мин. Выдержку проводили как без кавитационной обработки с разливкой в изложницу диаметром 10 мм, так и с кавитационной обработкой расплава лигатуры.

Кавитационное воздействие осуществляли с применением современного полупроводникового генератора УЗГ-5-22 мощностью 5 кВт и питающего преобразователя ПМС-15А-18 на частоте 18 кГц. Колебания в расплав передавали с помощью инструмента из сплава на основе ниобия диаметром 40 мм с амплитудой смещения ≥16 мкм.

На рис. 5 представлены результаты металлографического исследования структуры исходного прутка с агломератами дисперсных частиц диборидов титана.

На рис. 6 показана микроструктура переплавов лигатурного прутка Al–3 % Ti–1 % B по второй схеме.

* Литье проводили совместно с В.И. Ялфимовым.

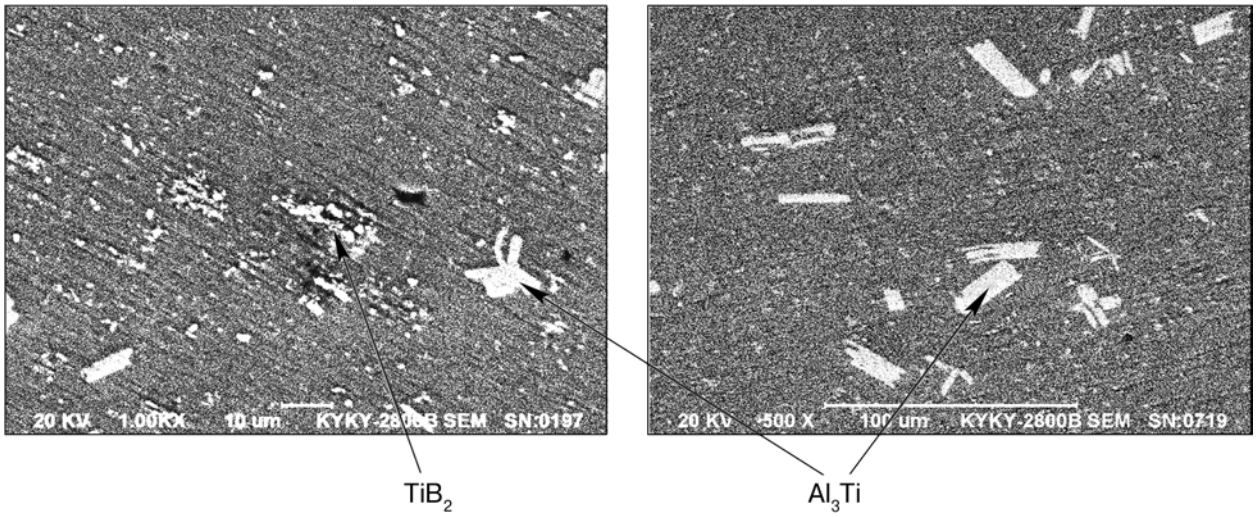


Рис. 5. Структура исходного лигатурного прутка состава Al – 3 % Ti – 1 %B диаметром 10 мм. Растровая электронная микроскопия

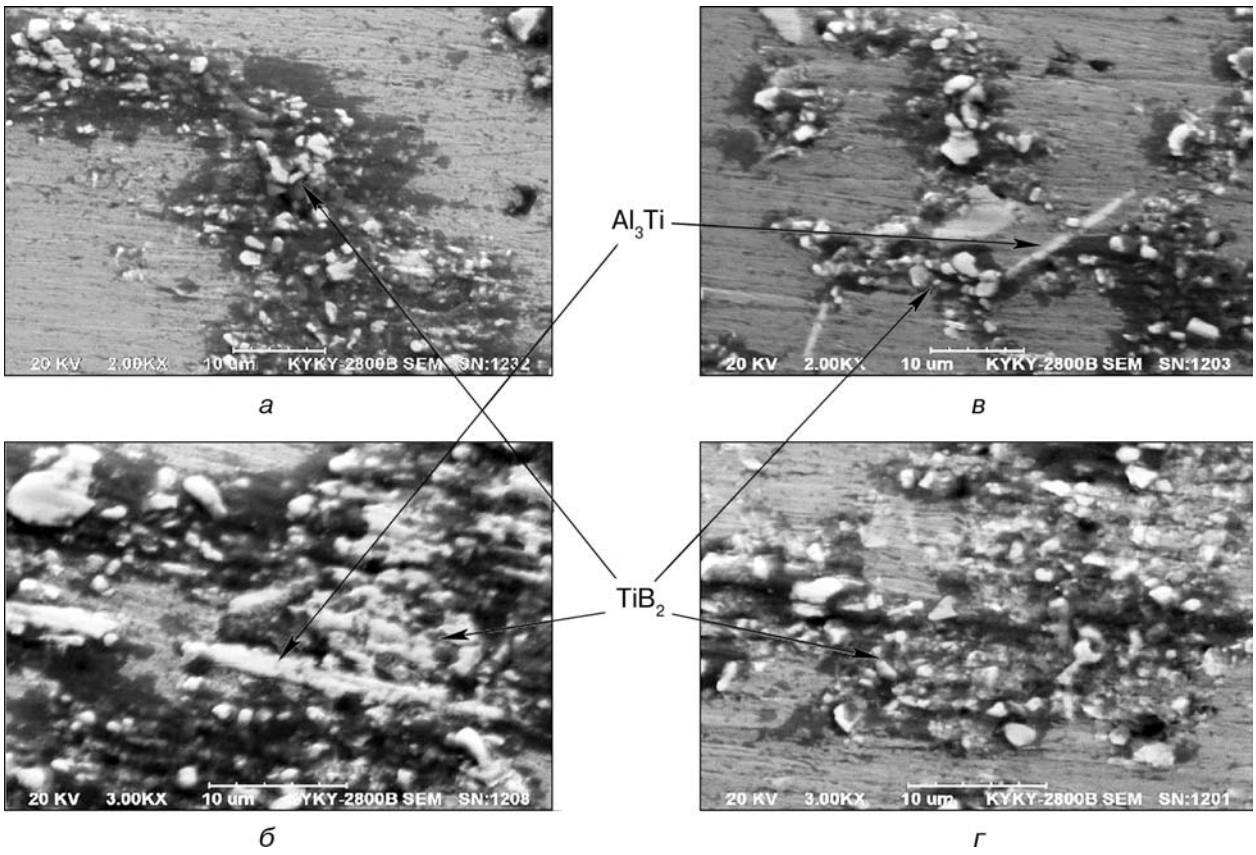


Рис. 6. Влияние кавитационной обработки на структуру лигатурного прутка состава Al–3 % Ti–1 % B после переплава. Растровая электронная микроскопия:
а, б – без кавитационной обработки расплава; *в, г* – с применением кавитационной обработки расплава

Анализ полученных результатов показал, что в структуре исходного прутка (см. рис. 5) встречаются пластинчатые первичные интерметаллиды Al_3Ti размером 20–25 мкм по длине и примерно равноосной формы размером 4–10 мкм, объединенные в скопления*.

* Микроструктурные исследования проводили совместно с Т.А. Мухиной и Л.Г. Карсановой.

Присутствуют также более мелкие частицы боридов титана (TiB_2) размером <2 мкм, сосредоточенные как в мелких скоплениях (несколько частиц), так и в скоплениях большего объема.

В структуре слитка диаметром 10 мм после переплава лигатурного прутка без кавитационной обработки потока расплава каких-либо существенных изменений обнаружено не было. Характер и распределение первичных интерметаллидов Al_3Ti оставались прежними.

В структуре аналогичного слитка после переплава с кавитационной обработкой расплава длина всех пластин алюминидов титана уменьшается в 2–3 раза в сравнении с аналогичными образцами, не прошедшими ультразвуковую обработку, и составляет 7–8 мкм. Равноосные кристаллы Al_3Ti не претерпели каких-либо изменений.

В структуре образцов после переплава в термостате как без кавитационной обработки (рис. 6, *а*, *б*), так и с ее применением (рис. 6, *в*, *г*), наблюдаются структурные изменения интерметаллидных соединений Al_3Ti аналогичного характера. Однако видно, что пластины алюминидов титана при применении кавитации имеют практически раздробленный вид (рис. 6, *в*).

Что касается частиц TiB_2, то они имеют постоянный размер 1–2 мкм независимо от технологии проведения эксперимента. При изучении структуры образцов переплавов выявлено значимое отличие в характере агломератов таких частиц (см. рис. 6). Хорошо видно, как после переплава с акустическим воздействием частицы диборидов титана отделяются друг от друга таким образом, что скопления становятся менее плотными и распределены более изолированно.

Анализ микроструктуры по третьей технологической схеме показал аналогичные результаты исследования частиц TiB_2 [10].

Другими словами, воздействие мощного кавитационного поля, с одной стороны, увеличивает скорость растворения алюминидов титана за счет раздробления пластин интерметаллидов и интенсивного перемешивания с повышением температуры расплава, что позволяет при ограниченной длине литейного желоба подобрать необходимое расстояние для полного растворения титановых интерметаллидов.

С другой стороны, при образовании большего количества изолированных частиц диборидов титана повышается возможный модифицирующий эффект лигатурного прутка при одном и том же его количестве, введенном в расплав алюминиевых сплавов.

Практическая реализация установленных принципов разрушения агломератов дисперсных зародышевых частиц при растворении в расплаве модифицирующих лигатурных прутков за счет воздействия акустической кавитации позволила получить недендритную структуру в сплаве типа 1960 при литье слитков диаметром 40 мм [11]. На рис. 7

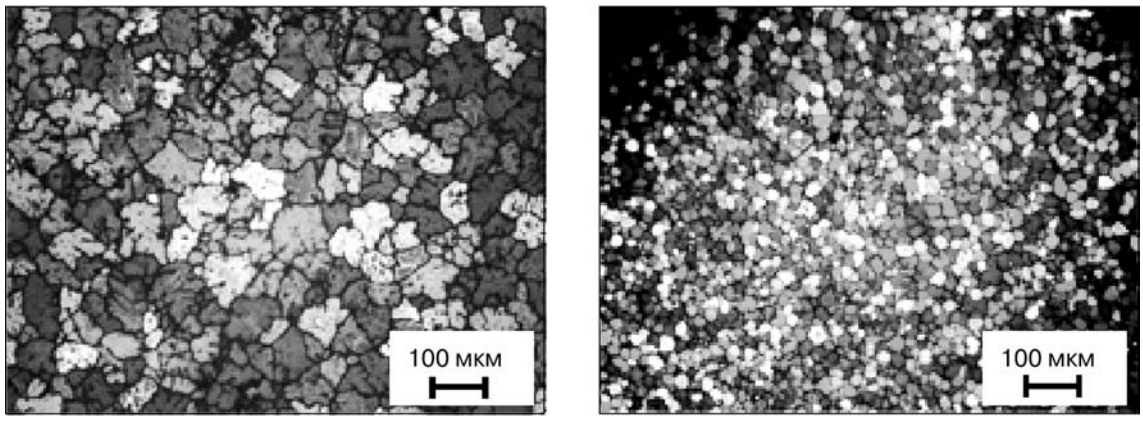


Рис. 7. Влияние кавитационной обработки при внепечном комплексном модифицировании на эффективность измельчения структуры слитков сплава типа 1960 [11]. Световая микроскопия, поляризованный свет:
а – без кавитационной обработки потока расплава; *б* – с применением кавитационной обработки потока расплава

показана микроструктура слитков, отлитых при введении в поток расплава лигатурного прутка состава Al–5 % Ti–1 % B без кавитационного воздействия (*а*) и с применением воздействия кавитации (*б*). Хорошо видно, что структура слитка после кавитационной обработки резко поменялась. Дендритный характер трансформировался в недендритный, при этом размер зерна уменьшился более чем в 3 раза.

Все это подтверждает рассмотренный выше механизм разрушения агломератов активных зародышеобразующих частиц и создает основу для применения технологии внепечного комплексного модифицирования потока расплава при непрерывном литье слитков алюминиевых сплавов.

Выводы

1. Обсуждаются условия, при которых кавитационная обработка расплава является действенным методом разрушения агломератов дисперсных частиц зародышевого действия при растворении лигатурных прутков систем Al–Ti–B или Al–Ti–C.

2. Адсорбированный в микрорельефе поверхности частиц диборидов титана водород служит активным зародышем для возникновения кавитационных пузырьков при ультразвуковой обработке потока расплава с продуктами растворения лигатурных прутков.

3. Величина давлений гидравлических импульсов в процессе захлопывания кавитационных пузырьков до 500 МПа и скорость микротечений до 100 м/с оказываются более чем достаточными факторами, чтобы разрушать агломераты дисперсных частиц.

4. Экспериментальная оценка процесса разрушения агломератов дисперсных частиц и растворения первичных интерметаллидов за счет кавитационного воздействия подтверждает результаты аналитического исследования. Проведенными опытами установлено частичное разрушение скоплений диборидов титана и вследствие этого увеличение числа активных зародышевых частиц.

5. Предложенный механизм акустического разрушения агломератов активных частиц модификатора может быть эффективно реализован в процессе непрерывного литья слитков алюминиевых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rumpf H.** The Strength of Granules and Agglomerates//Agglomeration, W.A. Knepper, ed. – New York: John Wiley Press, 1962. P. 382–403.
2. **Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н., Эскин Г.И.** Основы физики и техники ультразвука. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
3. **Абрамов О.В., Асташкин Ю.С., Петровский В.А.** К оценке давлений, возникающих при развитии кавитации в расплавах легкоплавких металлов//В кн.: Применение новых физических методов для интенсификации металлургических процессов. Научные труды МИСиС, № 77. – М.:Металлургия. 1974. С. 161–166.
4. **Прохоренко П.П., Дежкунов Н.В., Коновалов Г.Е.** Ультразвуковой капиллярный эффект. – Минск: Наука и техника, 1981. – 134 с.
5. **Sauter C., Emin M.A., Schuchmann H.P., Tavman S.** Influence of hydrostatic pressure and sound amplitude on the ultrasound induced dispersion and deagglomeration of nanoparticles //Ultrasonic somochemistry. 2008. № 15. P. 517–523.
6. **Salra V., Escobedo F., Joo Y.L.** Effect of shear on nanoparticle dispersion in polimer melts: A coarse-grained molecular dynamic study//The Journal of chemical physics. 2010. № 132, 024901. P. 1–11.
7. **Розенберг Л.Д.** Кавитационная область//В кн.: Мощные ультразвуковые поля/Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. С. 223–266.
8. **Эскин Г.И.** Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия. Изд. 2-е, пер. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 232 с.
9. **McKay B.J., Nunner G., Geier G.F., Schumacher P.** Impurities in Al – 5 Ti – 1 B grain refiner rod//International Journal of Cast Metals Research. 2008. V. 22. № 1–4. P. 212–215.
10. **Эскин Г.И., Бочвар С.Г., Ялфимов В.И.** К вопросу о формировании недендритной структуры в слитках алюминиевых сплавов//Технология легких сплавов. 2010. № 1. С. 38–43.
11. **Бочвар С.Г.** Новая концепция предельного измельчения структуры слитков алюминиевых сплавов в процессе непрерывного литья за счет внепечного комплексного модифицирования расплава//Технология легких сплавов. 2011. № 1. С. 12–21.