

1. Бойченко М. С., Рутес В. С., Фультмахт В. В. Непрерывная разливка стали. - М.: Metallurgizdat, 1961. - 230 с.
2. Рутес В. С., Аскольдов В. И., Евтеев Д. П. Теория непрерывной разливки. - М.: Metallurgia, 1971. - 296 с.
3. Самойлович Ю. А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле. - М.: Metallurgia, 1986. - 188 с.
4. Раза Х. С., Касьян Г. И., Осипов В. Г. Освоение производства непрерывнолитой заготовки на высокоскоростной шестиручьевой МНЛЗ // Металл и литье Украины. - 2001. - № 5-6. - С. 19-21.
5. Gasyan G., Mints A., Belomery N., Fesenko C. Operating Conditions for the Lining of a Steel Ladle in a Ladle-Furnace Unit at the MMP ISTIL (Ukraine) Joint-Stock Co // [REFRACTORIES AND INDUSTRIAL CERAMICS](#). - 2004. - № 5. - С. 312.
6. Якобше Р. Я., Козлова З. Л., Кучаев А. А., Дубоделови В. И. др. Влияние интенсивности электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе МНЛЗ на структуру непрерывнолитой заготовки // Metallургическая и горнорудная промышленность. - 2006. - № 2. - С. 19-22.

Поступила 26.05.2008

УДК 621.774.1:594.1

А. С. Нурадинов, Е. Д. Таранов, Ю. С. Коровико*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Исследовано влияние низкочастотной вибрации на структуру литых заготовок углеродистой стали. Показано, что вибрационная обработка слитков из стали марки 60 вызывает измельчение дендритной структуры и микроструктуры, устраняет транскристаллизацию, создает благоприятное строение вторичных структур стали и повышает ее механические свойства.

Досліджено вплив низькочастотної вібрації на структуру литих заготовок вуглецевої сталі. Показано, що вібраційна обробка зливоків із сталі марки 60 викликає подрібнення дендритної структури і микроструктури, усуває транскристалізацію, створює сприятливу будову вторинних структур сталі та підвищує її механічні властивості.

The influence of low - frequency vibration on the structure of the carbon steel ingots is explored. It is shown, that vibration treatment of castings made of steel grades 60 causes grinding of dendrite and microstructure size, eliminates transcrystallization, creates the favorable structure of the second transformations in steel and increases its mechanical qualities.

Ключевые слова: вибрация осевая вертикального типа, сталь, структура, свойства.

В работах [1, 2] при физическом моделировании на прозрачных средах (камфен) процессов кристаллизации и формирования структуры слитков под воздействием различных видов и параметров вибрации было установлено, что вибрация увеличивает темп кристаллизации и сокращает продолжительность затвердевания, диспергирует дендритную структуру при сокращении зоны столбчатых дендритов за счет обламывания и измельчения кристаллов, растущих на фронте кристаллизации, а также формирования неориентированных кристаллов в зоне кавитации сплава. Также было установлено, что наиболее эффективно влияние вибрации, ориентированной в вертикальной плоскости с частотой порядка 60-100 Гц и амплитудой 1,0-2,5 мм.

Для подтверждения данных моделирования на прозрачных средах провели исследование влияния вибрации вертикального типа с частотой 100 Гц и амплитудой 2,5 мм на структуру и свойства широкоинтервальной стали марки 60. Слитки диаметром 130 мм и высотой 360 мм отливали в форму из высокоглиноземистого шамота (Al_2O_3 до 75 %). Сталь выплавляли в индукционной печи ЛПЗ-37, температура заливки - 1560 °С. Термический анализ затвердевания проводили тремя платина-платинородиевыми термопарами, установленными на половине высоты слитка по его оси, около стенки формы и на половине радиуса слитка. Для определения теплового потока от расплава к форме воспользовались методикой В. А. Ефимова [3], также провели замеры температуры хромель-алюмелевыми термопарами по сечению стенки формы.

Установили, что вибрационная обработка вызывает существенное увеличение тепловых потоков, которые по ходу затвердевания уменьшаются от 31 до 20 кВт/м². Разница в значениях тепловых потоков составляет до 30 %.

Увеличение теплопередачи от перегретого расплава к стенке формы при наложении вибрации увеличило скорость затвердевания слитка и сократило общее время затвердевания. Так, коэффициент затвердевания возрос с 18 до 19,5 мм/мин^{0,5}, а время затвердевания сократилось с 13 до 10 мин.

Указанные изменения теплофизических параметров затвердевания привели к диспергированию дендритной структуры слитка (табл. 1). Так, протяженность зоны столбчатых дендритов уменьшилась в 1,52 раза, их ширина – в 2,5, а размер неориентированных дендритов – в 1,5-1,6.

Таблица 1. Параметры дендритной структуры слитков из стали марки 60

Вид обработки	Ширина зоны столбчатых дендритов, L , мм	Размеры столбчатых дендритов, мм		Размеры равноосных дендритов, мм		Количество дендритов на 225 мм ² (15x15), шт
		длина	ширина, b	длина	ширина, b_1	
Без вибрации	5,78	4,98	0,45	2,34	2,15	85-100
С вибрацией	3,92	2,9	0,18	1,48	1,36	180-200

Сопоставление изменения теплофизических параметров затвердевания и изменения параметров дендритной структуры позволяет утверждать, что факторами диспергирования дендритной структуры являются не только разрушение кристаллов с фронта кристаллизации и ускорение зарождения неориентированных дендритов в зоне кавитации, но и увеличение по ширине зоны концентрационного переохлаждения и его степени вследствие снижения температурного градиента. Этот эффект при модифицировании сталей азотом подробно рассмотрен в работе [4].

Изменения в дендритной структуре привели к значительным изменениям микроструктуры стали, параметров неметаллических включений и характера их распределения.

В образцах, вырезанных из контрольного слитка, размер аустенитного зерна согласно ГОСТу 5639-82 соответствует баллу № 1, а в образцах, вырезанных из опытного слитка, - баллам № 3 - 4 (рис. 1). Наблюдаемое существенное измельчение аустенитного зерна в образцах, вырезанных из опытного слитка, позволяет прогнозировать существенное повышение свойств такого металла.

Структура металла образцов, вырезанных из контрольного слитка, - феррито-перлитная. Доэвтектоидный феррит в виде прослоек окаймляет границы аустенитных зерен в виде сетки, а структура тела зерна – перлит с крупным «шагом» (расстояние между ферритом и цементитом), рис. 2, а. Твердость структуры составляет 1480-2300 МПа.

Структура металла образцов, вырезанных из опытного слитка, представлена на рис. 2, б. Структура металла – бейнитная с твердостью 2860-3210 МПа, а доэвтектоидный феррит практически отсутствует. Это объясняется тем, что металл опытного слитка охлаждался с

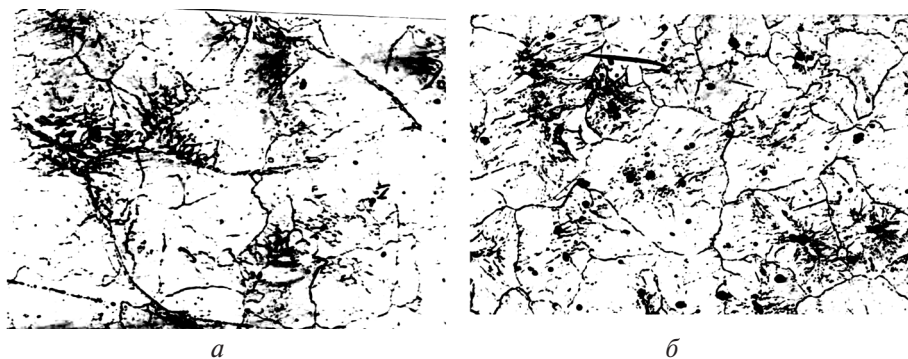


Рис. 1. Аустенитное зерно в контрольном и опытном слитках из стали марки 60: *а* - контрольный слиток; *б* - опытный, $\times 100$

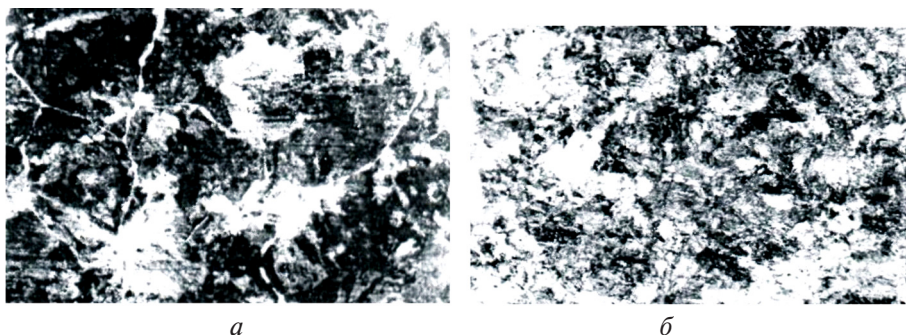


Рис. 2. Микроструктура образцов контрольного и опытного слитков из стали марки 60: *а* - контрольный слиток; *б* - опытный, $\times 50$

большой скоростью, чем металл контрольного слитка, вследствие чего механизм распада аустенита при охлаждении изменялся от диффузионного до промежуточного (от феррито-перлитного состояния до бейнитного).

При исследовании микроструктуры также установили, что в образцах, вырезанных из контрольных слитков, неметаллические включения (сульфиды) в большинстве случаев локализуются в прожилках доэвтектоидного феррита, выделяющегося по границам крупных аустенитных зерен (рис. 3, *а*). Изредка встречаются сульфиды в теле зерна. Расположение сульфидов по границам зерен особенно вредно с точки зрения образования горячих трещин. Наличие пленочных сульфидов в металле может способствовать низким механическим свойствам. В образцах, вырезанных из опытных слитков, сульфиды заметно мельче ($1,2-1,4$ мкм против $5,0-8,0$ мкм в контрольном образце), при этом они приобретают округлую форму и расположены произвольно по отношению к границам зерен (рис. 3, *б*). В данном случае наблюдаемые сульфиды можно отнести к сульфидам железа

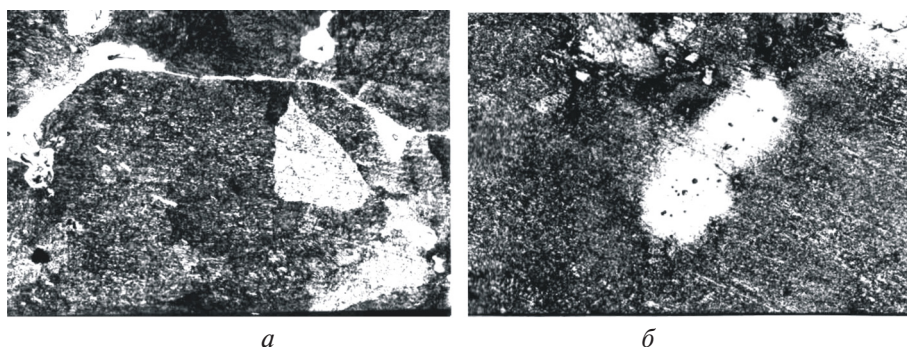


Рис. 3. Распределение сульфидов в структуре стали марки 60: *а* - контрольный слиток; *б* - опытный, $\times 100$

либо к двойному сульфиду $FeS \cdot MnS$. Размеры силикатных включений уменьшились с 24-30 до 6-7 мкм, то есть в 4-5 раз.

Известно, что химическая неоднородность, возникающая в результате сегрегации ликвирующих элементов при затвердевании стали, приводит к понижению ее механических свойств и их резкой анизотропии. Металлографическая картина, полученная в результате травления в пикрате натрия, свидетельствует о наличии химической неоднородности в структуре контрольных образцов. Неоднородность по кремнию проявляется голубоватой окраской, а по углероду – потемнением, что наиболее заметно по границам ячеек, где первоначальное распределение элементов отличается более высоким процентом концентрации. Границы ячеек, обогащенные кремнием и углеродом, очень часто совпадают с границами аустенитных зерен, на которых в результате превращения аустенита при охлаждении выделяется доэвтектоидный феррит. Как отмечено выше, в прожилках феррита в большом количестве обнаруживаются продолговатые сульфиды. Такое сочетание, как аномально крупное зерно аустенита, прожилка доэвтектоидного феррита, скопления продолговатых сульфидов, совпадение границ аустенита и границ ячеек, обогащенных кремнием и углеродом, может способствовать низким механическим свойствам слитка, в данном случае, контрольного. В образцах, вырезанных из опытного слитка, отмеченные выше отрицательные факторы отсутствуют.

Отмеченные положительные изменения структуры металла при вибрационной обработке объясняют и эффект повышения его механических свойств (табл. 2).

Таблица 2. Механические свойства стали марки 60 в литом состоянии

Зоны слитка	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_r , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение Ψ , %
Край	<u>825</u>	<u>635</u>	<u>7,4</u>	<u>6,1</u>
	755	605	6,4	3,95
$1/2$ радиуса	<u>770</u>	<u>600</u>	<u>10</u>	<u>6,5</u>
	720	690	6,9	3,8
Центр	<u>640</u>	<u>575</u>	<u>9,6</u>	<u>6,0</u>
	625	550	6,8	3,8
В поперечном сечении	<u>755</u>	<u>625</u>	<u>5,2</u>	<u>5,2</u>
	665	580	3,6	3,6

Примечание: числитель – с вибрацией; знаменатель – без вибрации

Как видно, показатели прочности увеличились до 8 %, а пластические – до 25-50 %, при этом их разница по зонам слитка и по направлению (продольное, поперечное) незначительная.

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что вибрационная обработка затвердевающих слитков из углеродистой стали вызывает закономерное измельчение макро- и микроструктуры, обеспечивает измельчение и равномерное распределение неметаллических включений, снижает анизотропию структуры и свойств металла отливки при повышении его прочности и пластичности.

Список литературы

1. Нурадинов А. С. Измельчение структуры затвердевающего сплава в условиях низкочастотной вибрации // Процессы литья. - 2008. - № 4. - С. 35-40.
2. Найдек В. П., Эльдарханов А. С., Нурадинов А. С., Таранов Е. Д. О механизме воздействия вибрации на кристаллизацию и структурообразование сплавов // Литейн. пр-во. - 2003. - № 9. - С. 13-15.
3. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. - С. 170-175.
4. Шипицын С. Я., Бабакин Ю. З. Механизм модифицирования сталей азотом // Процессы литья. - 1991. - № 3. - С. 33-43.

Поступила 21.01.2009