



УДК 669.187.26.004.12

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ

А. Л. Комнацкий, Т. А. Роик, А. М. Марченко, М. А. Долгинская

Приведены результаты исследований металлографической структуры, химического, фазового составов и физико-механических свойств высоколегированных коррозионно-стойких сталей 316L и С20, полученных способом электрошлакового переплава.

Results of investigations of metallographic structure, chemical, phase compositions and physical-mechanical properties of high-alloy corrosion-resistant steels 316L and S20, produced by the electroslag remelting method, are given.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; высоколегированные стали; микроструктура; дендриты; поликристаллиты; механические свойства

Надежность и срок службы современных машин и механизмов во многом определяются качеством их отдельных деталей. Особые требования предъявляются к изделиям, предназначенным для эксплуатации в тяжелых и предельно тяжелых условиях (воздействие повышенных и высоких температур, значительных нагрузок, наличие агрессивной среды). Выполнение этих требований приводит к усложнению химического состава металлов и сплавов, возникает необходимость повышения качества металла заготовок. При этом способ получения заготовок должен быть достаточно недорогим и технологичным [1].

С помощью традиционных способов получения заготовок, таких как ковка, прокатка слитков, центробежное литье, не всегда возможно получать изделия требуемого качества. Кроме того, в связи с использованием сложного и мощного кузнечно-прессового или прокатного оборудования ковка и прокатка являются достаточно дорогостоящими способами получения изделий. Применение центробежного литья при производстве заготовок (особенно трубных длинномерных) имеет свои преимущества — высокая производительность, экономия металла до 45... 50 %, сокращение производственного цикла [2]. Однако по качеству металла заготовки центробежного литья все же уступают ковным, поскольку наблюдается ликвация химических эле-

ментов, особенно углерода, как по их длине, так и по толщине [1].

В связи с этим явное преимущество имеет электрошлаковая технология, применение которой позволяет получать металл с высокой плотностью, физической и химической однородностью, изотропностью свойств, равномерным распределением неметаллических включений, отличающихся высокой чистотой и мелкодисперсным строением. Все сказанное выше приобретает особенно важное значение, если готовое изделие эксплуатируется в тяжелых условиях, при которых требуются его стабильно высокие физические и механические свойства.

В настоящей работе представлены результаты исследований металлографической структуры и свойств слитков из высоколегированных коррозионно-стойких сталей 316L и С20 зарубежного производства после электрошлакового переплава (ЭШП).

Работы проводились на промышленной монофилярной электрошлаковой печи ЭШП-2,5 с использованием короткого подвижного кристаллизатора. Программа исследований включала выбор технологических режимов выплавки двух слитков — полого размером 560×140×1550 мм, массой 2,45 т и сплошного диаметром 560, длиной 2050 мм, массой 3,6 т. Для выплавки полого слитка использовали электроды квадратного сечения (сторона квадрата составляла 120 мм), для сплошного слитка — электроды диаметром 400 мм.

Общий вид полого слитка из высоколегированной стали 316L после ЭШП представлен на рис. 1.

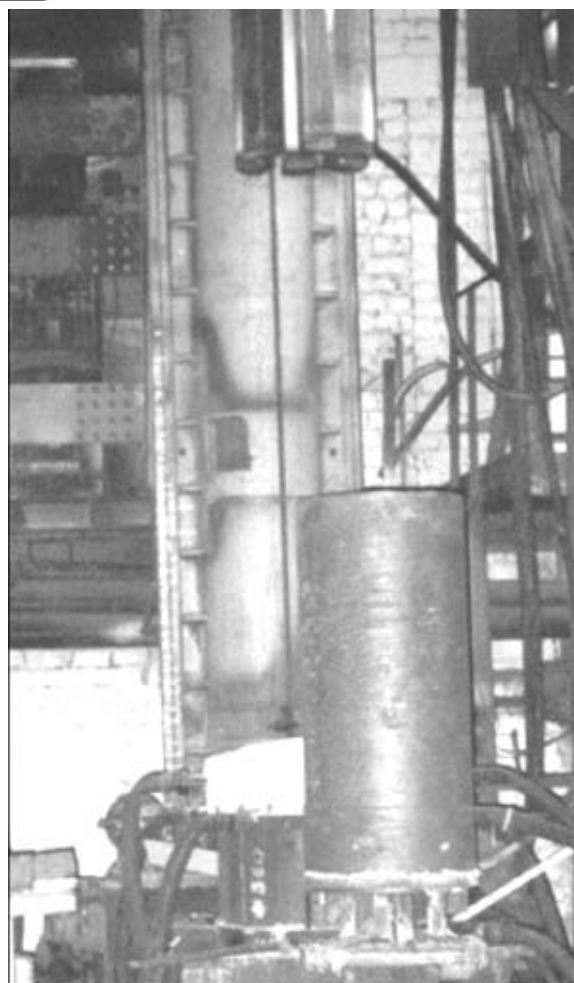


Рис. 1. Общий вид полого слитка

После выплавки полого слитка для проведения дальнейших исследований из его головной, средней и донной частей были вырезаны образцы. Химический состав исходных расходуемых электродов и выплавленного полого слитка из стали 316L приведен в табл. 1.

Как видно из таблицы, металл коррозионно-стойкой высоколегированной стали существенно рафинировался после ЭШП. При этом содержание

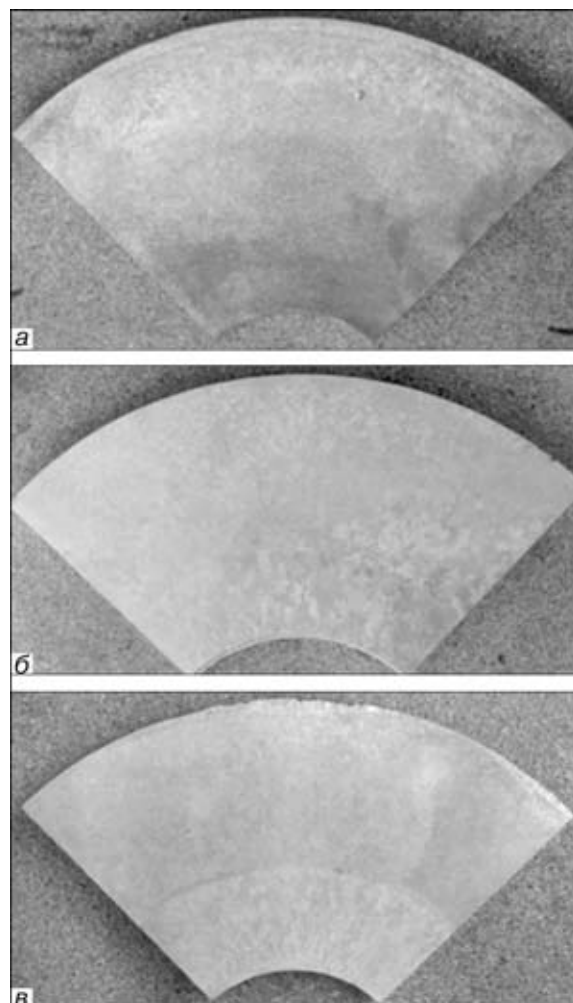


Рис. 2. Макроструктура поперечного сечения образцов, вырезанных из донной (а), средней (б) и головной (в) частей полого слитка

вредных примесей, особенно серы, по всей длине слитка значительно уменьшилось по сравнению с исходным металлом расходуемого электрода. Содержание легирующих элементов претерпело усреднение: они достаточно равномерно распределились по сечению и длине выплавленного полого слитка.

Таблица 1. Химический состав (% мас) полого слитка и исходных электродов из стали 316L

Образец	C	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Исходный электрод	0,016...0,020	1,83	0,036	0,014...0,016	16,9...17,9	9,56...9,82	2,26	0,41
Часть слитка:								
донная	0,013...0,014	1,79...1,81	0,026...0,028	0,0011...0,0012	17,0...18,0	9,0...9,4	2,09...2,12	0,37...0,39
средняя	0,014...0,015	1,81...1,82	0,027...0,028	0,008...0,009	17,5...18,0	9,7...10,0	2,16...2,18	0,36...0,38
головная	0,019...0,022	1,81...1,82	0,030	0,007...0,008	19,5...19,6	10,17...10,40	2,26...2,30	0,32...0,34

Окончание

Образец	Si	Ti	Al	B	Nb	V	W
Исходный электрод	0,55	0,02	0,015	0,0002	0,08	0,092	0,015
Часть слитка:							
донная	0,51...0,53	0,011...0,012	0,011...0,012	0,00016...0,00018	0,08	0,070...0,077	0,004...0,006
средняя	0,42...0,44	0,012...0,013	0,011...0,012	0,00018...0,0002	0,077...0,078	0,075...0,080	0,012...0,014
головная	0,47...0,48	0,012...0,013	0,006...0,008	0,00015...0,00017	0,074...0,076	0,07...0,09	0,007...0,009

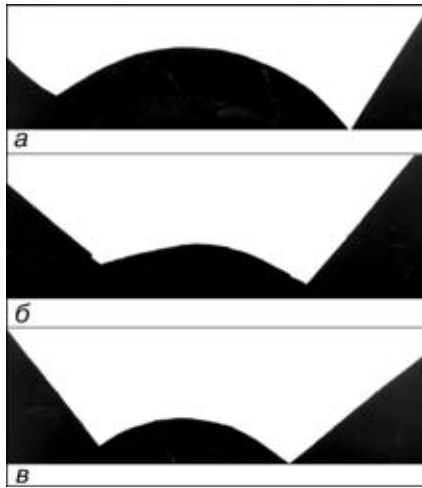


Рис. 3. Фрагменты серных отпечатков головной (а), средней (б) и донной (в) частей полого слитка

При исследовании макроструктуры поперечных сечений образцов, вырезанных из донной, средней и головной частей полого слитка (рис. 2), обнаружены различия в формировании структуры зон полого слитка.

Так, макроструктура образцов, вырезанных из донной и средней частей полого слитка (рис. 2, а, б), после ЭШП отличается однородным и плотным строением без дефектов ликвационного и усадочного характера. В макроструктуре образцов выделяются три зоны: две более мелкозернистые и плотные — у наружных слоев сечения слитка и третья — внутри сечения, имеющая меньшую плотность зерен. Наличие этих зон связано с различной скоростью кристаллизации в сечении слитка. При этом дефекты усадочного характера (типа пористости) внутри сечения слитка не образуются.

Макроструктура поперечного сечения головной части полого слитка (рис. 2, в) отличается наличием мелкозернистой полоски, выделяющейся на стыке кристаллизационных зон. Формирование такой зоны «встречи» кристаллов характерно для транс-кристаллитного механизма кристаллизации. Последний имеет место, когда рост радиально-осевых кристаллов происходит навстречу друг другу от стенок кристаллизатора и они стыкуются приблизительно на 1/3 толщины слитка, образуя узкие кристаллические полоски. Появление дефектов усадочного и ликвационного характера в зоне «встречи» транс-кристаллитов не наблюдалось. Такие различия в макроструктуре зон, расположенных по высоте слитка, очевидно, связаны с теплофизическими особенностями процесса ЭШП.

Таблица 2. Физико-механические свойства металла поперечных образцов полого слитка из стали 316L

Часть слитка	σ_b , МПа	σ_r , МПа	δ , %	ψ , %
Донная	480... 500	200... 210	60... 70	66... 69
Средняя	520... 540	230... 240	60... 65	66... 68
Головная	530... 560	250... 260	65... 66	56... 62

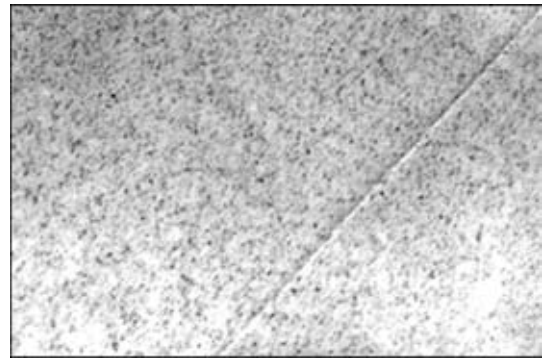


Рис. 4. Фрагмент серного отпечатка исходного электрода из стали 316L

Исследование макроструктуры всех частей полого слитка по серному отпечатку наличия неоднородности структуры, связанной с ликвацией серы, не выявили (рис. 3).

При сравнении серных отпечатков образцов, вырезанных из поперечного сечения полого слитка и исходного электрода из стали 316L (рис. 4), видно, что после ЭШП металл стал гораздо чище по содержанию серы, которая распределилась равномерно по сечению и длине слитка (см. табл. 1).

Исследования макроструктуры продольного сечения полого слитка выявили ряд особенностей, связанных с условиями его кристаллизации (рис. 5).

В макроструктуре продольного сечения донной части слитка (рис. 5, а) четко различаются дендритные оси, ориентированные под углом 45° к краевым зонам и направленные вертикально к центральной зоне. В макроструктуре средней части полой заготовки (рис. 5, б) дендритные оси в зоне, прилегающей к внутреннему отверстию слитка диаметром 140 мм, ориентированы под углом 45°, а в наружной — под углом 60°. Они направлены вертикально относительно центральной зоны. В макроструктуре продольного сечения головной части слитка (рис. 5, в) дендритные оси имеют транс-кристаллитный характер ориентации с углом наклона 60° в наружной зоне и 45° — в зоне, прилегающей к внутреннему отверстию слитка диаметром 140 мм. Зона «встречи» дендритов имеет вид узкой полоски, состоящей из столбчатых поликристаллитов. Фрагмент схемы кристаллизации полого слитка из стали 316L представлен на рис. 6.

Таблица 3. Содержание кислорода и азота в стали 316L исходного электрода и полого слитка

Образец	Массовая доля	
	O ₂	N
Исходный электрод	0,00959	0,07827
Часть слитка:		
донная	0,00163	0,01112
средняя	0,00184	0,00832
головная	0,00278	0,00941

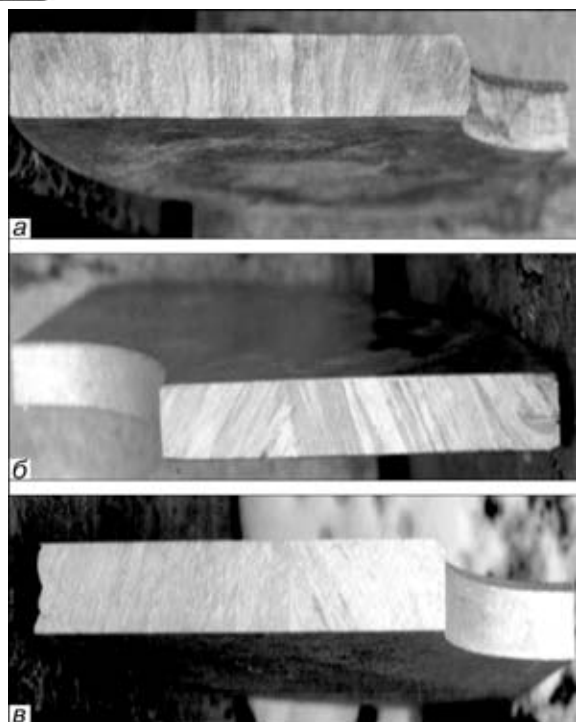


Рис. 5. Макроструктура продольного сечения образцов, вырезанных из донной (а), средней (б) и головной (в) частей полого слитка

Такой характер ориентации дендритных осей всех исследованных частей полого слитка способствует формированию благоприятного сочетания прочностных и пластических свойств металла (табл. 2).

Для исследования микроструктуры стали 316L полого слитка после ЭШП были вырезаны образцы из разных зон поперечного сечения слитка.

Методом металлографического анализа выявить в микроструктуре стали включения оксидного и сульфидного происхождения не удалось, очевидно, из-за незначительного содержания серы (см. табл. 1) и кислорода, однако были обнаружены нитриды размером до 10 мкм (3... 5 шт. в поле окуляра). Это связано со значительным, по сравнению с кислородом, содержанием азота, что коррелирует с данными, представленными в (табл. 3). Эти данные были получены при проведении исследований с использованием газоанализатора ТС-436 фирмы «Лекко» (США).

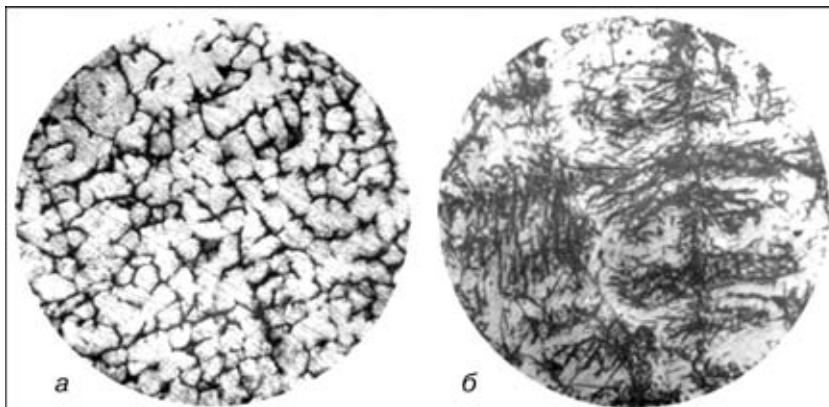


Рис. 7. Ориентация кристаллитов в микроструктуре стали 316L полого слитка (а, $\times 100$) и их структура (б, $\times 500$)

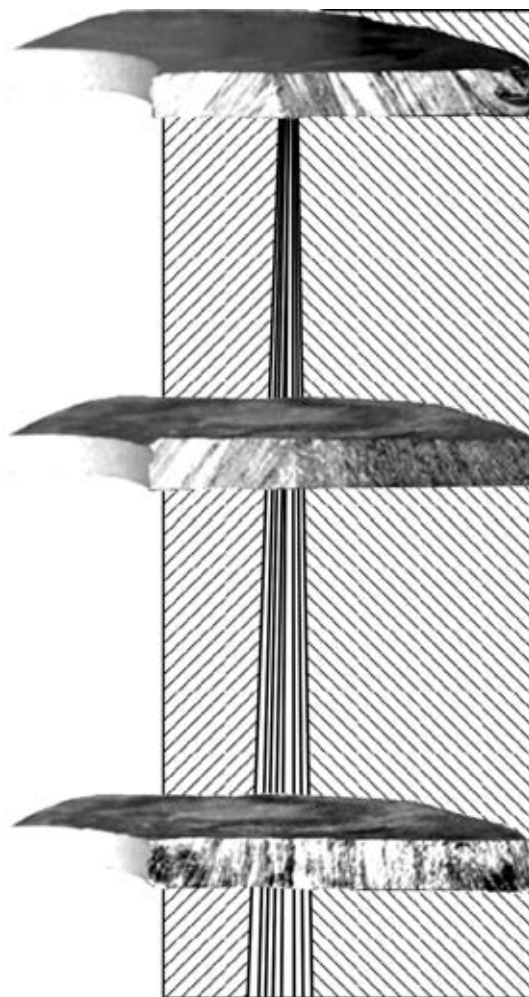


Рис. 6. Фрагмент схемы кристаллизации полого слитка из стали 316L (правая половина продольного сечения)

Как видно из табл. 3, содержание вредных газов (кислорода и азота) после ЭШП значительно уменьшилось и находилось в допустимом диапазоне, который для кислорода составляет 0,0021... 0,0049 % мас, для азота — 0,0050... 0,0135 % мас [3].

Металлографические исследования травленых шлифов показали, что микроструктура металла всех образцов аустенитная с ориентацией кристаллитов, присущей поликристаллическим материалам с дендритной формой кристаллов, характерной для кристаллизации металла в условиях температурного градиента и микроликвации легирующих элементов (рис. 7).

Следующим этапом экспериментов было исследование формирования структуры и свойств при ЭШП в сплошном слитке из высоколегированной коррозионно-стойкой стали С20, химический состав которой приведен в табл. 4.

Данные табл. 4 свидетельствуют о том, после ЭШП высоколегированной коррозионно-стойкой стали С20 металл стал более очищенным от серы, по сравнению с металлом исходного электрода, и однородным по хи-



Таблица 4. Химический состав (% мас) стали С20 сплошного слитка и исходных электродов

Образец	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
Исходный электрод	0,036... 0,033	0,82	0,033	0,018	0,52	16,3... 16,7	33,0	2,60
Часть слитка:								
головная	0,018... 0,021	0,77... 0,78	0,024... 0,025	0,005... 0,006	0,52... 0,53	15,9... 16,4	32,7... 32,8	2,48... 2,50
средняя	0,0152... 0,0156	0,77... 0,79	0,017... 0,018	0,004... 0,005	0,48... 0,50	15,7... 16,0	32,0... 32,4	2,17... 2,24
донная	0,014... 0,048	0,74... 0,77	0,018... 0,019	0,0011... 0,0012	0,50... 0,51	15,5... 15,8	31,5... 132,2	2,28... 2,33
Окончание								
Образец	Cu	Ti	Al	B	Nb	Sn	Ce	
Исходный электрод	3,28	0,040	0,070	0,0008	0,40	0,020	0,035	
Часть слитка:								
головная	3,21... 3,23	0,037... 0,038	0,010... 0,015	0,0012... 0,0013	0,41... 0,42	0,016... 0,017	0,038... 0,040	
средняя	3,10... 3,16	0,036... 0,037	0,020... 0,024	0,0007... 0,0008	0,40... 0,41	0,018... 0,019	0,034... 0,035	
донная	3,18... 3,22	0,034... 0,036	0,021... 0,023	0,0006... 0,0007	0,41... 0,42	0,017... 0,018	0,036... 0,037	

мическому составу как по сечению, так и по всей длине слитка.

Для проведения металлографических исследований из головной, средней и донной частей сплошного слитка были вырезаны образцы. Схема вырезки образцов из головной части слитка представлена на рис. 8, аналогичным образом производилась вырезка из его средней и донной частей.

В процессе кристаллизации происходит формирование макроструктуры различных зон металла, претерпевающего изменения от головной до донной частей

слитка. Схема формирования кристаллизационных зон при затвердевании слитка приведена на рис. 9.

В макроструктуре продольного сечения образцов головной и средней частей сплошного слитка различаются две зоны направленной кристаллизации (рис. 10): *I* — столбчатых дендритов, расположенных почти параллельно вертикальной оси слитка; *II* — наклонных дендритов, находящихся в центре слитка и образующих угол 45° с вертикальной его осью.

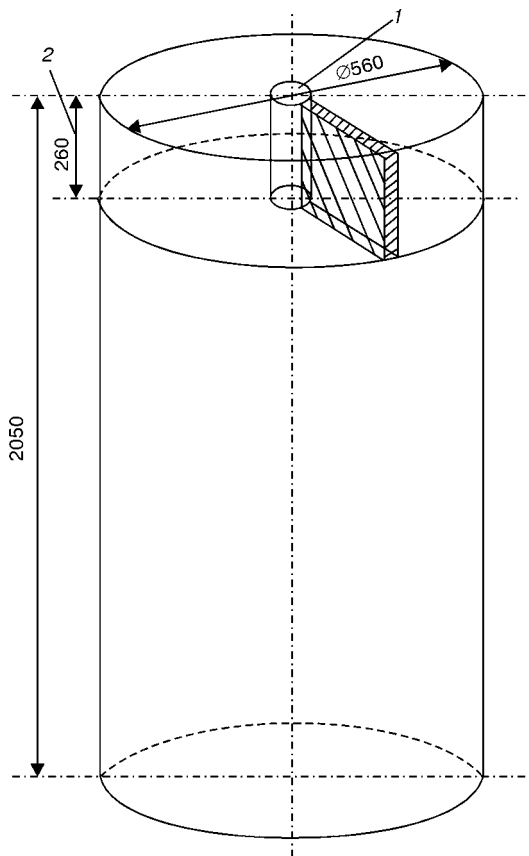


Рис. 8. Схема вырезки образцов из сплошного слитка стали С20: 1 — технологическое отверстие диаметром 80 мм; 2 — головная часть

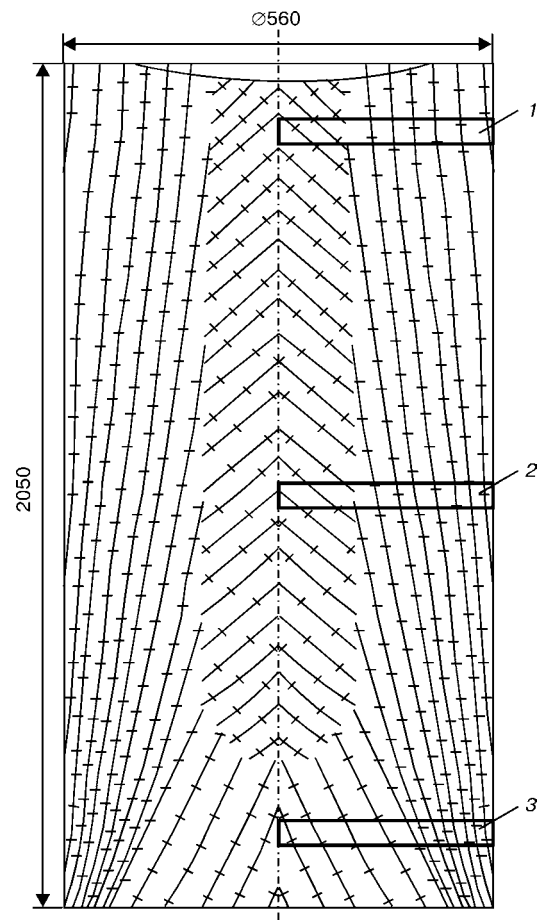


Рис. 9. Схема кристаллизации сплошного слитка: 1-3 — соответственно головная, средняя и донная части слитка

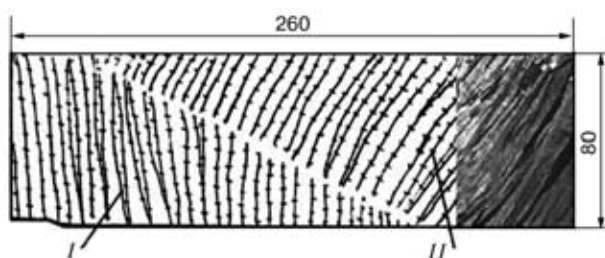


Рис. 10. Направленная кристаллизация в структуре продольного макрошлифа сплошного слитка

Макроструктура продольного сечения образца донной части слитка имеет транскристаллитный характер ориентации дендритов с углом наклона 60° , что отражает стабильность теплофизических условий затвердевания металла в этой части слитка.



Рис. 11. Микроструктура ($\times 200$) сплошного слитка из стали С20 после ЭШП

Направленное последовательное затвердевание металла в условиях постоянной подпитки жидким металлом фронта кристаллизации препятствовало появлению физической неоднородности. Вследствие этого в макроструктуре поперечных сечений образцов, вырезанных из всех частей сплошного

Таблица 5. Физико-механические свойства металла поперечных образцов сплошного слитка из стали С20

Часть слитка	σ_b , МПа	σ_t , МПа	δ , %	ψ , %
Донная	440... 460	170... 180	60,5... 75,0	63... 65
Средняя	480... 500	200... 220	65,0... 70,0	64... 66
Головная	470... 490	190... 210	65,0... 68,0	63... 65

слитка, отсутствуют пористость, усадочные раковины и ликвационные зоны.

Наличие физической и химической однородности металла образцов, вырезанных из продольного и поперечного сечения слитка, подтверждается



Рис. 12. Образования δ -феррита в микроструктуре ($\times 200$) стали С20

исследованиями их макроструктуры по методу Баумана. Фрагмент серного отпечатка свидетельствует о высокой чистоте химически однородного металла.

Исследования структуры образцов, вырезанных из всех трех зон сплошного слитка стали С20, показали, что металл имеет структуру аустенита с включениями интерметаллидных образований с размером первичных зерен, соответствующих 6–7 баллам шкалы ГОСТ 5639–82 (рис. 11).

Главные дендритные оси в микроструктуре стали С20 обозначены формированиями δ -феррита, которые, как видно из рис. 12, на травленном шлифе выглядят светлыми образованиями в темной окантовке. Наличие δ -феррита свидетельствует о большой скорости кристаллизации при высоких температурах. Внутри его зерен наблюдаются очерченные зоны, являющиеся темными вытянутыми образованиями интерметаллидов и карбидов, а также соединения в виде светлых мелких ромбиков и сферических то-

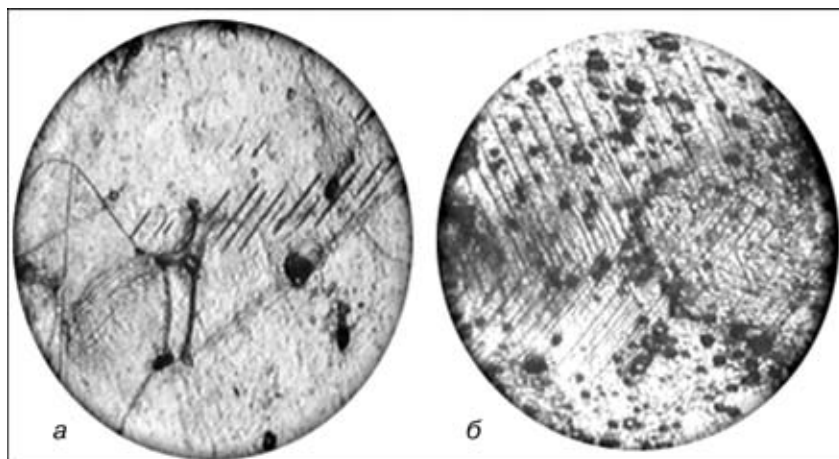


Рис. 13. Интерметаллидные (а, $\times 200$) и карбидные (б, $\times 500$) образования в микроструктуре стали С20

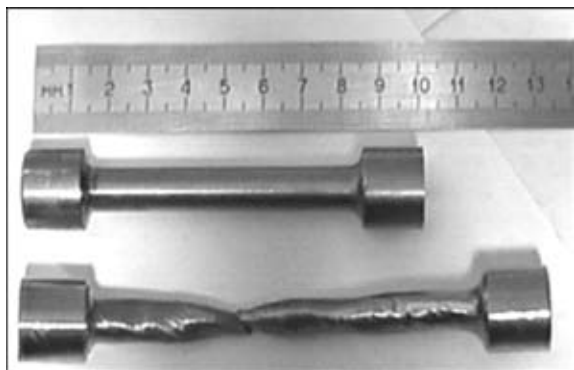


Рис. 14. Образцы из стали 316L до и после механических испытаний

чек, игольчатые соединения, ориентированные по типу штриховых линий, разделяющих зерна (рис. 13). Разнообразие их форм и ориентации, вероятно, связано с большим содержанием легирующих элементов (см. табл. 4), а также с кристаллографическими особенностями образованных ими сложных соединений.

Таким образом, исследования микроструктуры образцов, вырезанных из сплошного слитка, показали, что для нее характерна направленная кристаллизация дендритной структуры без ликвационных скоплений; уже в литом состоянии аустенитные зерна имеют вид четко очерченных интерметаллидных соединений железа с легирующими элементами, входящими в химический состав стали С20.

Исследования физико-механических свойств стали С20 после ЭШП были выполнены на образцах продольного сечения, вырезанных из головной, средней и донной частей слитка (табл. 5).

Приведенные в табл. 5 данные свидетельствуют о высокой физической, химической и структурной однородности стали С20 после ЭШП. Хорошие прочностные и, особенно, пластические свойства металла получены благодаря правильному подбору технологических параметров переплава (скорость плавления, выбор шлака и толщина гарнисажа). Это подтверждается видом образцов до и после испытаний на растяжение (рис. 14).

Исходя из изложенного выше можно сделать вывод, что дальнейшее совершенствование ЭШП позволит получать крупногабаритные заготовки, отличающиеся высоким качеством металла как по всей длине, так и по сечению слитка из любых сталей сложного химического состава.

1. *Электрошлаковый металл* / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 681 с.
2. *Курбатов И. П.* Артиллерийское материаловедение. — М.: Воениздат, 1969. — 305 с.
3. *Неметаллические включения и дефекты в электрошлаковом слитке* / С. Е. Волков, А. Е. Волков, Ю. И. Забалуев, Г. А. Бураковский. — М.: Металлургия, 1979. — 135 с.

Научно-технический центр
артиллерийско-стрелкового вооружения, Киев
Поступила 14.01.2003



ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ, МЕТАЛЛУРГИИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

VIII Международная научно-техническая конференция

октябрь 2003 г.

г. Тбилиси

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Ассоциация сварщиков Грузии
Институт металлургии и материаловедения
им. Ф. Н. Тавадзе АН Грузии
Межгосударственный научный совет по сварке
и родственным технологиям
Грузинский технический университет
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Международная ассоциация «Сварка»
Департамент Грузии по науке и технологиям
Союз научных и инженерных обществ Грузии
Международная нефтяная корпорация Грузии
Инженерная академия Грузии
Государственный военный научно-технический
центр «Дельта»
Балканский союз металлургов

Справки по тел.: +(955 32) 227511,
факс: +(955 32) 221965 *Якобашвили С. Б.*
тел.: +(955 32) 370267 *Бараташвили И. Б.*



ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:
*Сварка
Металлургия
Материаловедение
Коррозия и защита металлов
Экология, безопасность человека
и природы
Родственные технологии*