

УДК 669.18

ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТОЙ СТАЛИ 40X25H20C2 НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

ГУБЕНКО С.И.^{1*}, *д.т.н, проф.*,
БЕСПАЛЬКО В.Н.^{2*}, *к.т.н., доц.*,
БАЛЕВА Ю.И.^{3*}, *аспирант*

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: sgubenko@email.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

^{2*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 374-82-66, e-mail: valentina.bespalko@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-1977-6197

^{3*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (063) 44-96-757, e-mail: dui2006@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4065-7467

Аннотация. *Цель.* Исследование влияния технологических факторов и макроструктуры центробежнолитых заготовок из стали 40X25H20C2 на механические свойства при различных температурах. *Методика.* Исследована макроструктура трубных заготовок из стали 40X25H20C2, полученных на горизонтальных машинах центробежного литья. Изучали влияние параметров литья на характер макроструктуры. Проводили механические испытания образцов при различных температурах. *Результаты.* Показано влияние параметров центробежного литья и дендритной макроструктуры отливок из стали 40X25H20C2 на механические свойства. Установлено, что наиболее благоприятной является разветвленная транскристаллитная макроструктура трубных заготовок. Определены параметры центробежного литья, обеспечивающие получение разветвленной транскристаллитной макроструктуры трубных заготовок. Показано влияние параметров центробежного литья и макроструктуры на механические свойства трубных заготовок при разных температурах. *Научная новизна.* Обсуждаются процессы формирования макроструктуры трубных заготовок из стали 40X25H20C2 при разных условиях центробежного литья и ее влияние на механические характеристики. *Практическая значимость.* Полученные результаты позволяют получать центробежнолитые трубные заготовки из стали 40X25H20C2 с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: центробежное литье; макроструктура; механические свойства

ВПЛИВ МАКРОСТРУКТУРИ ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК З ВІДЦЕНТРОВОЛИТОЇ СТАЛІ 40X25H20C2 НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИ РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

ГУБЕНКО С.І.^{1*}, *д.т.н, проф.*,
БЕСПАЛЬКО В.Н.^{2*}, *к.т.н., доц.*,
БАЛЄВА Ю.І.^{3*}, *аспірант*

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: sgubenko@email.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

^{2*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 374-82-66, e-mail: valentina.bespalko@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-1977-6197

^{3*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (063) 44-96-757, e-mail: dui2006@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4065-7467

Анотація. *Мета.* Вивчити вплив технологічних факторів і макроструктури відцентрово литих заготовок із сталі 40X25H20C на механічні властивості при різних температурах. *Методика.* Досліджена макроструктура трубних заготовок з сталі 40X25H20C2, отриманих на горизонтальних машинах відцентрового лиття. Вивчали вплив параметрів лиття на характер макроструктури. Проводили механічні випробування зразків при різних температурах. *Результати.* Показано вплив параметрів відцентрового лиття та дендритної макроструктури виливків із сталі 40X25H20C2 на механічні властивості. Встановлено, що найбільш бажаною є розгілена транскристалітна макроструктура трубних заготовок. Визначені параметри відцентрового лиття, які забезпечують отримання розгіленої транскристалітної макроструктури трубних заготовок. Показано вплив параметрів відцентрового лиття та макроструктури на механічні властивості трубних заготовок при різних температурах. *Наукова новизна.* Обговорюються процеси формування макроструктури трубних заготовок із сталі 40X25H20C2 при різних умовах відцентрового лиття та її вплив на механічні характеристики. *Практична*

значимость. Отримані результати дозволяють отримувати відцентрово литі трубні заготовки із сталі 40X25H20C2 з підвищеними механічними та експлуатаційними властивостями.

Ключові слова: відцентрове лиття; макроструктура; механічні властивості

INFLUENCE OF MACROSTRUCTURE OF PIPE CASTINGS FROM THE CENTRIFUGAL CAST STEEL 40X25H20C2 ON THE MECHANICAL PROPERTIES UNDER DIFFERENT TEMPERATURES

GUBENKO S.I. ^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*
BESPALKO V. N. ^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.)*
BALEVA, Y. I. ^{3*}, *Graduate student*

^{1*} Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, pr. Gagarin, 4, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: sgubenko@email.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

^{2*} Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, pr. Gagarin, 4, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. 38 (0562) 374-82-66, e-mail: valentina.bespalko@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-1977-6197

^{3*} Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, pr. Gagarin, 4, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (063) 44-96-757, e-mail: dui2006@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4065-7467

Abstract. Purpose. Study of the influence of technological factors and macrostructure of centrifugally-cast billets from steel 40H25N20C2 on the mechanical properties under different temperatures. **Methodology.** Macrostructure of pipe castings from steel 40H25N20C2 produced by horizontal centrifugal casting machines was analyzed. The influence of parameters of centrifugal casting on the character of macrostructure was investigated. Mechanical tests under different temperatures were carried out. **Findings.** It was shown the influence of parameters of centrifugal casting and dendritic macrostructure of pipe castings from steel 40H25N20C2 on the mechanical properties. It was fixed that more propitious is the dispersed transcrystalline macrostructure of pipe castings. The parameters of centrifugal casting ensuring formation of dispersed transcrystalline macrostructure of pipe castings were determined. It was shown the influence of parameters of centrifugal casting and macrostructure on the mechanical properties of pipe castings under different temperatures. **Originality.** We discuss the processes of macrostructure formation of pipe castings from steel 40H25N20C2 under different conditions of centrifugal casting and their influence on the mechanical properties. **Practical value.** The obtained results allow to produce centrifugal castings from steel 40H25N20C2 with raise mechanical and service properties.

Keywords: centrifugal casting; macrostructure; mechanical properties

Введение

Жаропрочные трубы из стали типа 40X25H20C2 отлитые центробежным литьем имеют в основном столбчатую макроструктуру с радиально расположенными кристаллами, растущими от наружной поверхности к центру. Поскольку имеется достаточно большое количество технологических факторов, влияющих на кристаллизацию указанных труб (температура и время перегрева, температура выпуска, температура заливки, скорость заливки, скорость охлаждения, вибрация формы, раскисленность металла, модифицирование и т.д.), периодически возникают проблемы, связанные с пониженным уровнем технологических и механических свойств, развитием разрушения литых труб, охрупчиванием стали выделениями σ -фазы и т.д. [1 - 3]. Возникают также противоречия, связанные с влиянием макроструктуры на свойства центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2. С одной стороны, известно, что трубы со столбчатой макроструктурой имеют более высокую длительную прочность по сравнению с трубами с равноосной макроструктурой, что нашло отражение в ТУ 3-228-69. С другой стороны, установлено, что межкристаллитная хрупкость этих изделий

обусловлена наличием грубой столбчатой структуры и развитием разрушения именно вдоль границ столбчатых дендритов. В то же время, наблюдается разнообразие макро- и микроструктур центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2, обусловленных влиянием ряда технологических факторов, указанных выше [4 - 6].

Цель

Целью данной работы было исследование влияния технологических факторов и макроструктуры центробежнолитых заготовок из стали 40X25H20C2 на механические свойства при различных температурах.

Материалы и методики

Выплавка стали 40X25H20C2 и отливка из нее центробежнолитых труб производилась в соответствии с технологической инструкцией № 37-Т-71 на центробежной машине С-2 - №1. В процессе получения труб изучали влияние таких факторов, как температура заливки расплава $t_{зал}$, в интервале 1440...1600°C, степень перегрева относительно температуры ликвидус $\Delta t_{пер}$ 40...200°C при постоянных технологических параметрах, скорость

вращения изложницы 900, 1200, 1500 об/мин, которые поддаются управлению. Были отлиты трубы размером 158x40x3650 мм. Исследована макроструктура темплетов от центробежнолитых трубных заготовок из стали 40X25H20C2, химический состав которых, температура заливки

расплава и характеристика макроструктуры приведены в таблице 1. Проводили механические испытания на растяжение, ударную вязкость, длительную прочность при различных температурах.

Таблица 1.

Химический состав которых, температура заливки расплава $t_{зал}$ и характеристика макроструктуры центробежнолитых трубных заготовок из стали 40X25H20C2

№ пл	$t_{зал}, ^\circ\text{C}$	Содержание элементов, об %					Макроструктура от наружной поверхности трубы (протяженность зоны столбчатых кристаллов, мм)
		C	Si	Mn	Cr	Ni	
1	1550	0,37	2,00	1,26	25,4	21,3	Грубые столбчатые кристаллы
2	1540	0,40	2,20	1,32	25,4	20,8	Грубые столбчатые кристаллы
3	1500	0,39	2,35	1,27	25,2	20,3	Столбчатые разветвленные кристаллы, увеличение дисперсности дендритной структуры по сравнению с пл. 1
4	1500	0,37	1,48	1,30	25,1	20,0	Столбчатые разветвленные кристаллы, увеличение дисперсности дендритной структуры по сравнению с пл. 1
5	1460	0,39	2,20	1,27	25,2	20,0	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (24 мм)
6	1450	0,40	2,44	1,28	25,4	20,3	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (15 мм)
7	1440	0,39	2,14	0,76	25,7	21,4	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (7,5 мм)

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование отливок стали 40X25H20C2 показало, что можно получить различную макроструктуру и механические свойства в зависимости от температура заливки расплава $t_{зал}$ и степени перегрева $\Delta t_{пер}$. Характер процесса кристаллизации, определяющего макроструктуру центробежнолитой трубной заготовки из стали 40X25H20C2, зависит от температуры заливки расплава в форму и условий его затвердевания. В настоящей работе исследовано влияние температуры заливки расплава $t_{зал}$, степени перегрева $\Delta t_{пер}$, а также скорости вращения изложницы V на макроструктуру центробежнолитой трубной заготовки из стали 40X25H20C2.

Изменяя температуру заливки расплава $t_{зал}$, можно существенно влиять на структуру отливки (табл. 2). Понижение температуры заливки расплава уменьшает склонность сплава к транскристаллизации и способствует получению равноосной дендритной структуры. При проведении экспериментов в данной работе были выбраны значения температуры заливки стали 1440, 1450, 1460, 1500, 1540, 1550 $^\circ\text{C}$. Анализ макроструктуры темплетов опытной партии литых заготовок подтвердил, что с понижением температуры заливки расплава $t_{зал}$ (при прочих равных условиях) склонность к транскристаллизации уменьшается, увеличивается зона равноосных кристаллов от наружной поверхности литой заготовки (рис. 1).

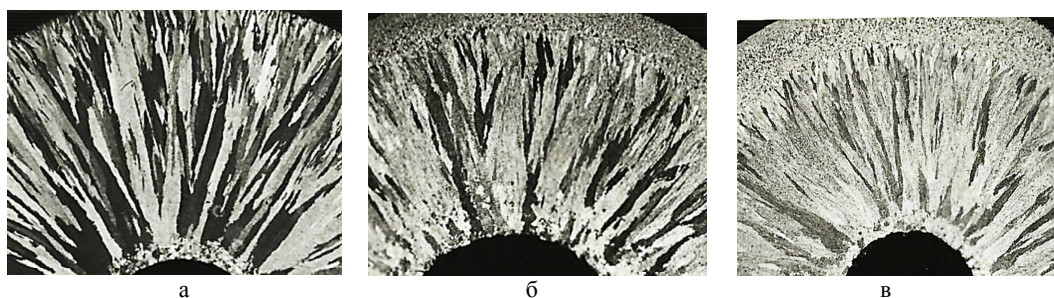


Рис. 1. Изменение характера макроструктуры центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 в зависимости от температуры заливки расплава $t_{зал}$: а – 1550, б – 1460, в – 1440 $^\circ\text{C}$.

Таким образом, в центробежнолитых трубах из стали 40X25H20C2 можно получить полностью транскристаллитную (столбчатую) структуру, столбчатую структуру с небольшим вкраплением с внутренней поверхности равноосных кристаллов глубиной до 10 мм, смешанную структуру с разным уровнем протяженности зоны столбчатых кристаллов - 25...39 мм, 20...25 мм, 5...20 мм от наружной поверхности, а также полностью равноосную структуру, хотя последняя структура получается редко и всегда содержит зоны столбчатых

кристаллов вблизи стенок отливки. Изменяя температуру заливки расплава $t_{зал}$ можно в широком диапазоне варьировать механические свойства изучаемых труб (табл. 2). Испытания проведены на стандартных образцах типа Гагарина диаметром 6,0 мм.

Сравнительный анализ механических свойств трубных заготовок, полученных при различной температуре заливки расплава, которые имеют транскристаллитную (столбчатую) макроструктуру, показал, что с увеличением степени ее дисперсности

(при понижении температуры заливки) прочностные и пластические свойства, а также ударная вязкость при комнатной температуре возрастают. Это несколько противоречит данным, полученным в работах других авторов, где утверждается, что пластические свойства и ударная вязкость отливок с транскристаллитной макроструктурой при повышении температуры заливки расплава возрастают. Полученные в настоящей работе

результаты можно объяснить положительным влиянием на весь комплекс механических характеристик измельчения столбчатых кристаллов и увеличения уровня их разветвленности (рис. 2). Транскристаллитная макроструктура отливок, образовавшаяся при температуре заливки расплава $t_{зал} 1540...1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет среднюю величину сечения ветвей дендритов $4,6\text{ мм}^2$, а образовавшаяся при температуре заливки расплава $t_{зал} 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $2,3\text{ мм}^2$.

Таблица 2.

Влияние температуры заливки расплава $t_{зал}$ на макроструктуру и механические свойства центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 при комнатной температуре

№ пл	$t_{зал},\text{ }^{\circ}\text{C}$	Макроструктура (протяженность зоны столбчатых кристаллов, мм)	Механические свойства				
			$\sigma_b, \text{ МПа}$	$\sigma_t, \text{ МПа}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	КСУ, Дж/м ²
1	1550	Грубые столбчатые кристаллы	535	335	22,1	16,6	17,5
2	1540	Грубые столбчатые кристаллы	525	300	21,3	16,0	17,1
3	1500	Столбчатые разветвленные кристаллы, увеличение дисперсности дендритной структуры по сравнению с пл. 1	580	375	24,3	18,9	22,9
4	1500	Столбчатые разветвленные кристаллы, увеличение дисперсности дендритной структуры по сравнению с пл. 1	594	395	24,4	18,6	22,1
5	1460	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (24 мм)	530	360	18,1	14,2	14,4
6	1450	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (15 мм)	505	320	16,3	14,0	13,9
7	1440	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (7,5 мм)	491	308	14,9	12,0	13,3
ТУ 1333-001-01216736-2001 (ООО ПНЦ «Трубосталь»)			Не менее				
			448	195	10	-	-

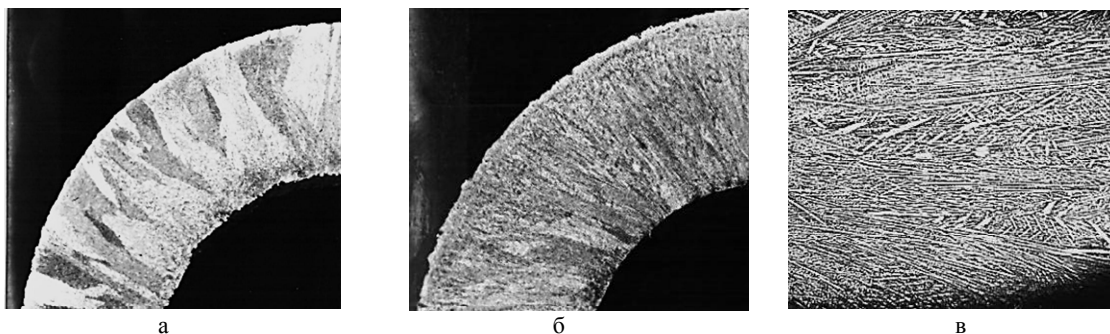


Рис. 2. Транскристаллитная макроструктура центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 при температуре заливки расплава 1550 (а), 1500 (б) и 1450 (в) °С.

Отливки, имеющие смешанную макроструктуру, имеют более низкий уровень прочностных, пластических и вязких характеристик, определяемый различным соотношением ширины зон с различной формой дендритов (табл. 2). Неоднородный характер макроструктуры отливок обеспечивает неоднородное распределение напряжений при испытаниях, что вызывает снижение механических свойств центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2. Следует отметить, что изменение пластичности при переходе от равноосной к столбчатой макроструктуре носит параболический характер. Испытания на длительную прочность показали, что у металла с разветвленной транскристаллитной макроструктурой она значительно выше (практически в 2 раза), чем у металла с равноосной либо смешанной макроструктурой. Например, при температуре 900 °С образцы с разветвленной

транскристаллитной макроструктурой (пл. 3) имели $\sigma_b 88,2\text{ МПа}$ и время до разрушения 220 ч, а образцы со смешанной макроструктурой (пл. 5) – соответственно $\sigma_b 73,4\text{ МПа}$ и время до разрушения 108 ч. Предел длительной прочности σ_{10000} при 900 и 1000 °С образцов с разветвленной транскристаллитной макроструктурой (пл. 3) составлял соответственно 138 и 15 МПа, образцов со смешанной макроструктурой (пл. 5) – соответственно 115 и 12 МПа.

Анализ механических свойств образцов показал, что лучшим сочетанием механических свойств обладают центробежнолитые трубы из стали 40X25H20C2 с столбчатыми кристаллами, полученными при температуре заливки расплава 1500 °С. Именно эта температура заливки расплава обеспечивает получение транскристаллитной макроструктуры, состоящей из тонких разветвленных

столбчатых кристаллов. Эти результаты согласуются с рекомендациями относительно преимуществ получения транскристаллитной макроструктуры, однако в настоящих исследованиях установлено, что для повышения уровня механических характеристик необходимо получать однородную транскристаллитную макроструктуру центробежнолитых труб, состоящую из тонких разветвленных столбчатых кристаллов.

Следует ожидать, что такая макроструктура обеспечит высокий комплекс механических и технологических свойств и меньшую склонность к проявлению наследственной микрон неоднородности при последующей пластической и термической обработке центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2. Уровень механических характеристик

превышал аналогичные показатели согласно ТУ 1333-001-01216736-2001 (ООО ПНЦ «Трубосталь»).

Влияние характера макроструктуры отливок, определяемой температурой заливки расплава $t_{зал}$, проявляется и при повышенных температурах испытаний, соответствующих рабочим температурам данных труб (табл. 3). При повышенных температурах испытания наблюдается достаточно высокие значения пластических характеристик и ударной вязкости, что свидетельствует о высоком уровне запаса пластичности. Самый высокий комплекс механических характеристик при всех температурах испытаний имеют образцы, изготовленные из отливок 3, 4, имеющих транскристаллитную макроструктуру в виде разветвленных столбчатых кристаллов.

Таблица 3.

Влияние температуры заливки расплава $t_{зал}$ на макроструктуру и механические свойства центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 при высокотемпературных испытаниях

№пл	$t_{зал}$, °C	Макроструктура (протяженность зоны столбчатых кристаллов, мм)	$T_{исп}$, °C	Механические свойства при повышенной температуре				
				σ_b , МПа	σ_t , МПа	δ , %	Ψ , %	КСУ, Дж/м ²
1	1550	Грубые столбчатые кристаллы	900	82,1	67,9	29,2	58,8	36,6
			1000	60,4	43,9	34,6	63,0	26,3
			1100	31,3	28,8	46,5	73,0	21,3
			1200	18,8	16,3	52,6	-	17,3
2	1540	Грубые столбчатые кристаллы	900	79,6	64,2	28,2	57,1	37,2
			1000	44,3	35,1	35,1	62,1	26,5
			1100	29,3	23,3	41,5	74,0	23,2
			1200	15,1	12,3	48,3	-	21,1
3	1500	Столбчатые разветв-ленные кристаллы, увеличение дисперсности дендритной структуры по срав. с пл.1 и 2	900	88,2	74,3	40,7	63,8	40,2
			1000	55,1	45,2	40,9	69,3	27,1
			1100	32,4	29,6	45,0	71,2	24,6
			1200	18,5	16,1	59,0	83,2	23,0
4	1500	Столбчатые разветв-ленные кристаллы, увеличение дисперсности дендритной структуры по срав. с пл.1 и 2	900	89,3	75,4	37,9	61,2	41,1
			1000	58,0	46,1	44,9	77,5	28,8
			1100	34,0	30,3	48,4	81,3	25,4
			1200	19,2	17,2	57,2	-	22,7
5	1460	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (24 мм)	900	73,4	63,0	31,3	39,2	36,1
			1000	54,4	40,5	40,1	51,1	25,5
			1100	26,9	19,6	42,8	58,8	20,6
			1200	16,2	15,6	50,9	-	20,0
6	1450	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (15 мм)	900	71,2	60,6	30,2	32,7	35,8
			1000	53,2	40,1	37,2	35,9	25,1
			1100	27,1	19,1	40,2	48,3	21,3
			1200	16,0	15,0	45,3	-	20,1
7	1440	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (7,5 мм)	900	70,3	60,1	27,2	30,1	31,3
			1000	54,2	40,0	33,9	33,7	22,5
			1100	27,9	18,4	38,1	41,0	20,3
			1200	15,2	14,8	41,0	-	19,0

С помощью температурных кривых, записанных с применением радиационного параметра на электронном потенциометре, определяли степень перегрева расплава над температурой ликвидус в момент заливки $\Delta t_{пер}$, которая существенно влияет на характер макроструктуры центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2. Это связано с тем, что при

небольшом перегреве $\Delta t_{пер}$ температура залитого расплава близка к температуре кристаллизации стали 40X25H20C2 и происходит объемная кристаллизация отливки с выделением большего количества теплоты кристаллизации. В этих условиях теплота кристаллизации не может быть мгновенно отведена, что приводит к разогреву расплава и созданию

условий для образования равноосных кристаллов. При большом перегреве $\Delta t_{пер}$ кристаллизация начинается в объеме расплава, непосредственно соприкасающемся со стенками формы, чем создаются условия, когда в поверхностной зоне вблизи стенки формы одновременно существуют твердый слой металла и расплав. Наличие большого градиента температур способствует образованию столбчатых кристаллов, ориентация которых определяется направлением теплового потока от жидкой сильно перегретого расплава к фронту кристаллизации, имеющего температуру кристаллизации стали.

Исследование влияния степени перегрева расплава $\Delta t_{пер}$ относительно температуры ликвидус на макроструктуру и механические свойства

центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 показало, что уменьшение величины $\Delta t_{пер}$ способствует уменьшению склонности данной стали к транскристаллизации, уменьшению протяженности зоны столбчатых кристаллов в отливке и снижению прочностных и пластических характеристик (табл. 4). Установлено, что температура заливки расплава $t_{зал}$, обеспечивающая столбчатую структуру отливки, находится в пределах 1500...1600°C при степени перегрева 100...200 °C (табл. 4). Для обеспечения повышенных механических характеристик необходимо получение тонко разветвленной транскристаллитной макроструктуры центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 необходимыми температуре заливки расплава $t_{зал}$ 1500 °C., степень перегрева расплава $\Delta t_{пер}$ 100 °C .

Таблица 4.

Влияние степени перегрева расплава $\Delta t_{пер}$ на макроструктуру и механические свойства центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2

$\Delta t_{пер}, ^\circ\text{C}$	Макроструктура (протяженность зоны столбчатых кристаллов, мм)	Механические свойства			
		σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	Ψ , %
150	Грубые столбчатые кристаллы	535	330	22,1	16,6
140	Грубые столбчатые кристаллы	520	316	21,3	16,0
100	Столбчатые разветвленные кристаллы	585	357	24,3	18,9
100	Столбчатые разветвленные кристаллы	590	389	24,4	18,6
60	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (24 мм)	530	375	18,1	14,2
60	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (24 мм)	470	330	18,4	14,8
50	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (15 мм)	500	315	16,3	14,0
50	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (15 мм)	485	310	16,0	14,4
40	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (7,5 мм)	480	300	14,9	12,0
40	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (7,5 мм)	475	300	14,8	12,4

Научная новизна и практическая значимость. Обсуждаются процессы формирования макроструктуры трубных заготовок из стали 40X25H20C2 при разных условиях центробежного литья и ее влияние на механические характеристики. Полученные результаты позволяют получать центробежнолитые трубные заготовки из стали 40X25H20C2 с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами.

Выводы. Для обеспечения повышенных механических характеристик необходимо получение тонко разветвленной транскристаллитной

макроструктуры центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 размерами 158x40x3650 мм, что можно осуществить при следующих технологических параметрах: температуре заливки расплава $t_{зал}$ 1500 °C., степень перегрева расплава относительно температуры ликвидус $\Delta t_{пер}$ 100 °C, скорость вращения изложницы 1200...1500 об/мин. Такие параметры центробежного литья обеспечивают высокий комплекс механических и эксплуатационных характеристик.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Юдин С. Б., Левин М. М., Розенфельд С. Е. Центробежное литье. - М.: Машиностроение, 1972. – 415 с. <http://www.twirpx.com/file/443757/>
2. Степанов Ю.А., Анучина М.Г., Баландин Г.Ф., Константинов Л.С. Специальные виды литья. – М.: Машиностроение, 1970. – 224 с. <http://www.twirpx.com/file/1656405/>
3. Саротовкин Д.Д. Дендритная кристаллизация. - М. : Metallurgizdat, 1953. – 176с. <http://www.twirpx.com/file/968019/>
4. Ю.Г. Соловьев. Центробежное литье - прогрессивный метод производства стальных труб и трубных заготовок. Сборник «Производство труб» ВНИТИ, 1968. - 303 с. <http://search.rsl.ru/ru/record/01006075051>

5. Губенко С.И., Балева Ю.И. Торможение межзеренного разрушения центробежнолитой стали 40X25H20C2 вторичными границами. МЕТАЛЛ И ЛИТЬЕ УКРАИНЫ, 2016, № 2 (273), с.2-8
http://ptima.kiev.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=343&Itemid=68&lang=ru
6. Губенко С.И., Беспалько В.Н., Юрковский В.В., Балева Ю.И. Неметаллические включения в центробежнолитой стали 40X25H20C2. Металл и литье Украины, 2016, №4, с. 13-17
http://ptima.kiev.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=349&Itemid=68&lang=ru
7. Идельчик И.Е. Гидравлическое сопротивление. - Л.: Госенергоизда, 1954. – 221с. <http://www.twirpx.com/file/881578/>
8. Н.В. Рулла, Г.М. Самойлов, М.М. Студинский «Производство труб». Сборник статей по теории и практике трубного производства. Москва, 1961, выпуск 4. <http://www.twirpx.com/file/55095/>
9. Губенко С.И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепропетровск.: НметАУ ИЦ «Системные технологии», 2014. – 01с.
<http://catalog.odnb.odessa.ua/opac/index.php?url=/notices/index/IdNotice:298626/Source:default>
10. Мовчан Б.А. Границы кристаллитов в литых металлах и сплавах. К., Техника, 1970, 212с.
<http://www.twirpx.com/file/1055556/>
11. Голиков И.Н., Масленков С.Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. М., Metallurgiya, 1977, 224 с.
<http://www.twirpx.com/file/1980026/>
12. Саратовкин Д.Д. Дендритная кристаллизация. М., Metallurgizdat, 1957, 125 с. <http://www.twirpx.com/file/968019/>
13. Явойский В.И. Теория процессов производства стали. М., Metallurgizdat, 1963, 820 с.
<http://ntb.misis.ru:591/OpacUnicode/index.php?url=/notices/index/IdNotice:421394/Source:default>

REFERENCES

1. Yudin S. B., Levin M. M., Rozenfeld S. E. Tsentrobezhnoe lite. [Centrifugal casting] - М.: Mashinostroenie, 1972. – 415 s.
<http://www.twirpx.com/file/443757/>
2. Stepanov Yu.A., Anuchina M.G., Balandin G.F., Konstantinov L.S. Spetsialnyie vidyi litya.[Special types of casting] – М.: Mashinostroenie, 1970. – 224 s. <http://www.twirpx.com/file/1656405/>
3. Sarotovkin D.D. Dendritnaya kristallizatsiya.[Dendritic crystallization] - М. : Metallurgizdat,1953. – 176s.
<http://www.twirpx.com/file/968019/>
4. Yu.G. Solovev. Tsentrobezhnoe lite - progressivnyiy metod proizvodstva stalnyih trub i trubnyih zagotovok. [Centrifugal casting - advanced method of manufacturing steel tubes and tubular blanks] Sbornik «Proizvodstvo trub» VNITI, 1968. - 303 s.
<http://search.rsl.ru/record/01006075051>
5. Gubenko S.I., Baleva Yu.I. Tormozheniye mezhzerennogo razrusheniya tsentrobezhnolitoi stali 40Cr25Ni20Si2 vtorichnymi granitsami. [Inhibition of intergranular failure tsentrobezhnolityh steel 40X25H20C2 secondary boundaries] Metal I litye Ukrainy. 2016. №2 (273). s.2-8 http://ptima.kiev.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=343&Itemid=68&lang=ru
6. Gubenko S.I., Bepalko V.N., Yurkovskiy V.V., Baleva Yu.I. Nemetallicheskiye vklyucheniya v tsentrobezhnolitoi stali 40Cr25Ni20Si2. [Non-metallic inclusions in steel tsentrobezhnolityh 40Cr25Ni20Si2]. Metall i litye Ukrainy. 2016. №4. s. 13-17
http://ptima.kiev.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=349&Itemid=68&lang=ru
7. Idelchik I.E. Gidravlicheskiye soprotivleniye. [Hydraulic resistance] - L.: Gosenergoizda. 1954. – 221s.
<http://www.twirpx.com/file/881578/>
8. N.V. Rulla. G.M. Samoylov. M.M. Studinskiy «Proizvodstvo trub». [The production of pipes].Sbornik statey po teorii i praktike trubnogo proizvodstva. Moskva. 1961. vypusk 4. <http://www.twirpx.com/file/55095/>
9. Gubenko S.I. Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklyucheniy.[Physics of fracture steel near non-metallic inclusions]. Dnepropetrovsk.: NmetAU ITs «Sistemnyye tekhnologii». 2014. – 01s.
<http://catalog.odnb.odessa.ua/opac/index.php?url=/notices/index/IdNotice:298626/Source:default>
10. Movchan B.A. Granitsy kristallitov v litykh metallakh i splavakh. [The boundaries of the crystallites in cast metals and alloys]. К.. Tekhnika. 1970. 212s.
<http://www.twirpx.com/file/1055556/>
11. Golikov I.N., Maslenkov S.B. Dendritnaya likvatsiya v stalyakh i splavakh.[Dendritic liquation in steels and alloys]. М.. Metallurgiya. 1977. 224 s. <http://www.twirpx.com/file/1980026/>
12. Saratovkin D.D. Dendritnaya kristallizatsiya. [Dendritic crystallization]. М.. Metallurgizdat. 1957. 125 s.
<http://www.twirpx.com/file/968019/>
13. Yavoyskiy V.I. Teoriya protsessov proizvodstva stali. [Theory of steel-making processes]. М.. Metallurgizdat. 1963. 820 s.
<http://ntb.misis.ru:591/OpacUnicode/index.php?url=/notices/index/IdNotice:421394/Source:default>

Статья рекомендована к публикации д-ром.техн.наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); д-ром.физ.-мат.наук, проф. Д. В. Лаухин (Украина)