

УДК 621.74.042:669.017

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ МАКРОСТРУКТУРУ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТОЙ СТАЛИ 40X25H20C2

ГУБЕНКО С. И.<sup>1\*</sup>, д. т. н., проф.,  
БЕСПАЛКО В. Н.<sup>2</sup>, к. т. н., доц.,  
БАЛЕВА Ю. И.<sup>3</sup>, асп.

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: [sgubenko@email.dp.ua](mailto:sgubenko@email.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 374-82-66, e-mail: [valentina.bespalko@yandex.ru](mailto:valentina.bespalko@yandex.ru), ORCID ID: 0000-0002-1977-6197

<sup>3</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (063) 44-96-757, e-mail: [dui2006@mail.ru](mailto:dui2006@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-4065-7467

**Аннотация. Постановка проблемы** – исследование влияния технологических факторов на макроструктуру центробежнолитых заготовок из стали 40X25H20C2. Исследована макроструктура трубных заготовок из стали 40X25H20C2, полученных на горизонтальных машинах центробежного литья. Изучали влияние параметров литья на характер макроструктуры. Проводили макроанализ и механические испытания. **Результаты.** Показано влияние параметров центробежного литья на формирование дендритной макроструктуры отливок из стали 40X25H20C2. 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. **Научная новизна.** Обсуждаются процессы формирования макроструктуры трубных заготовок из стали 40X25H20C2 при разных условиях центробежного литья. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют изготавливать центробежнолитые трубные заготовки из стали 40X25H20C2 с повышенными механическими свойствами.

*Ключевые слова:* центробежное литье; макроструктура; механические свойства; трубная заготовка; макроанализ

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ МАКРОСТРУКТУРУ ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК ІЗ ВІДЦЕНТРОВОЛИТОЇ СТАЛІ 40X25H20C2

ГУБЕНКО С. І.<sup>1\*</sup>, д. т. н., проф.,  
БЕСПАЛКО В. Н.<sup>2</sup>, к. т. н., доц.,  
БАЛЄВА Ю. І.<sup>3</sup>, асп.

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: [sgubenko@email.dp.ua](mailto:sgubenko@email.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 374-82-66, e-mail: [valentina.bespalko@yandex.ru](mailto:valentina.bespalko@yandex.ru), ORCID ID: 0000-0002-1977-6197

<sup>3\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (063) 44-96-757, e-mail: [dui2006@mail.ru](mailto:dui2006@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-4065-7467

**Анотація. Постановка проблеми** – вивчення впливу технологічних факторів на макроструктуру відцентрово литих заготовок із сталі 40X25H20C. Досліджено макроструктуру трубних заготовок із сталі 40X25H20C2, отриманих на горизонтальних машинах відцентрового лиття. Вивчали вплив параметрів лиття на характер макроструктури. Проводили макроаналіз та механічні випробування. **Результати.** Показано вплив параметрів відцентрового лиття на формування дендритної макроструктури виливків із сталі 40X25H20C2. Установлено, що найбільш сприятлива розгалужена транскристалітна макроструктура трубних заготовок. Визначено параметри відцентрового лиття, які забезпечують отримання розгалуженої транскристалітної макроструктури трубних заготовок. Показано вплив параметрів відцентрового лиття та макроструктури на механічні властивості трубних заготовок. **Наукова новизна.** Обговорюються процеси формування макроструктури трубних заготовок із сталі 40X25H20C2 за різних умов відцентрового лиття. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють виготовляти відцентрово литі трубні заготовки із сталі 40X25H20C2 з підвищеними механічними властивостями.

*Ключові слова:* відцентрове лиття; макроструктура; механічні властивості; трубна заготовка; макроаналіз

# ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL FACTORS DETERMINING MACROSTRUCTURE OF PIPE CASTINGS FROM THE CENTRIFUGAL CAST STEEL 40X25H20C2

GUBENKO S.I.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
BESPALKO V. N.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*,  
BALEVA Yu.I.<sup>3</sup>, *Graduate Student*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: [sgubenko@email.dp.ua](mailto:sgubenko@email.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 374-82-66, e-mail: [valentina.bespalko@yandex.ru](mailto:valentina.bespalko@yandex.ru), ORCID ID: 0000-0002-1977-6197

<sup>3</sup> Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, el. +38 (063) 44-96-757, e-mail: [dui2006@mail.ru](mailto:dui2006@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-4065-7467

**Abstract. Purpose.** Study of the influence of technological factors on the macrostructure of centrifugally-cast billets from steel 40H25N20C2. **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. Macro analysis and mechanical tests were carried out. **Findings.** It was shown the influence of parameters of centrifugal casting on the formation of dendritic macrostructure of pipe castings from steel 40H25N20C2. 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. **Originality.** We discuss the processes of macrostructure formation of pipe castings from steel 40H25N20C2 under different conditions of centrifugal casting. **Practical value.** The obtained results allow to produce centrifugal castings from steel 40H25N20C2 with raise mechanical properties.

*Keywords:* centrifugal casting; macrostructure; mechanical properties; tubular billet; macroanalysis

## 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  $\sigma$ -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, обусловленное влиянием ряда технологических факторов, указанных выше [4–6].

**Цель работы** – исследование влияния технологических факторов на макроструктуру центробежнолитых заготовок из стали 40X25H20C2.

## Материалы и методы исследований

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 140...1600 °С, степень перегрева относительно температуры ликвидус  $\Delta t_{пер} = 40...200$  °С при постоянных технологических параметрах, скорость вращения изложницы 900, 1 200, 1 500 об./мин., которые поддаются управлению. Были отлиты трубы размером 158 × 40 × 3 650 мм. Исследована макроструктура темплетов от центробежнолитых трубных заготовок из стали 40X25H20C2, химический состав которых, температура заливки расплава и характеристика макроструктуры приведены в таблице 1.

**Химический состав, температура заливки расплава  $t_{зал}$  и характеристика макроструктуры центробежнолитых трубных заготовок из стали 40X25H20C2 / Chemical composition, temperature of pouring the melt  $t_{зал}$  and characterization of the macrostructure of centrifugal pipe castings from steel 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	1 550	0,37	2,00	1,26	25,4	21,3	Грубые столбчатые кристаллы
2	1 540	0,40	2,20	1,32	25,4	20,8	Грубые столбчатые кристаллы
3	1 500	0,39	2,35	1,27	25,2	20,3	Столбчатые разветвленные кристаллы, увеличение дисперсности дендритной структуры по сравнению с пл. 1
4	1 500	0,37	1,48	1,30	25,1	20,0	Столбчатые разветвленные кристаллы, увеличение дисперсности дендритной структуры по сравнению с пл. 1
5	1 460	0,39	2,20	1,27	25,2	20,0	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (24 мм)
6	1 450	0,40	2,44	1,28	25,4	20,3	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (15 мм)
7	1 440	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 температуры заливки расплава  $t_{зал}$  и степени перегрева  $\Delta t_{пер}$  (рис. 1). 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 три значения температуры заливки стали 1 440, 1 450, 1 460, 1 500, 1 540, 1 550  $^\circ\text{C}$ . 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. 2).

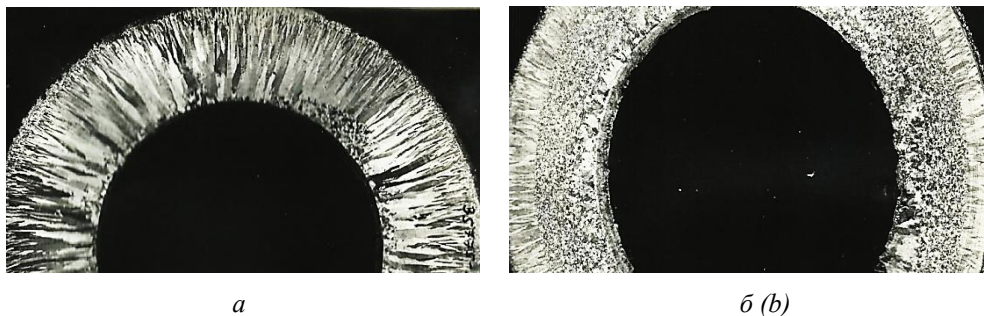


Рис. 1. Макроструктура центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 / Fig. 1. Macrostructure of centrifugal pipe casting of steel 40H25N20C2

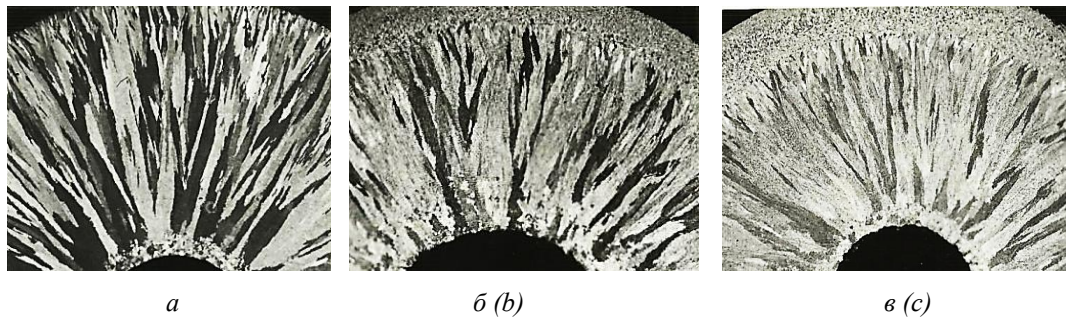


Рис. 2. Изменение характера макроструктуры центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 в зависимости от температуры заливки расплава  $t_{зал}$ : а – 1 550 °С; б – 1 460 °С; в – 1 440 °С / Fig. 2. Change of character of macrostructure of centrifugal pipe casting of steel 40H25N20C2 depending on the temperature of priming of melt  $t_{prim}$ : а – 1 550 °С; б – 1 460 °С; в – 1 440 °С

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, 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. 3). Транскристаллитная макроструктура отливок, образовавшаяся при температуре заливки расплава  $t_{зал} = 1\ 540...1\ 600\ ^\circ\text{C}$ , имеет среднюю величину сечения ветвей дендритов  $4,6\ \text{мм}^2$ , а образовавшаяся при температуре заливки расплава  $t_{зал} = 1\ 500\ ^\circ\text{C}$  –  $2,3\ \text{мм}^2$ .

Таблица 2

**Влияние температуры заливки расплава  $t_{зал}$  на макроструктуру и механические свойства центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 при комнатной температуре / The influence of the pouring temperature of the melt  $t_{зал}$  on macrostructure and mechanical properties of centrifugal casting of steel pipes 40X25H20C2 at room temperature**

№ пл.	$t_{зал}, ^\circ\text{C}$	Макроструктура (протяженность зоны столбчатых кристаллов, мм)	Механические свойства				
			$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	$KCU_2$ , Дж/м <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1 550	Грубые столбчатые кристаллы	535	335	22,1	16,6	17,5
2	1 540	Грубые столбчатые кристаллы	525	300	21,3	16,0	17,1
3	1 500	Столбчатые разветвленные кристаллы, увеличение дисперсности дендритной структуры по сравнению с пл. 1	580	375	24,3	18,9	22,9
4	1 500	Столбчатые разветвленные кристаллы, увеличение дисперсности дендритной структуры по сравнению с пл. 1	594	395	24,4	18,6	22,1
5	1 460	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (24 мм)	530	360	18,1	14,2	14,4
6	1 450	Зоны столбчатых и равноосных кристаллов (15 мм)	505	320	16,3	14,0	13,9

Окончание таблицы 2							
1	2	3	4	5	6	7	8
7	1 440	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	-	-

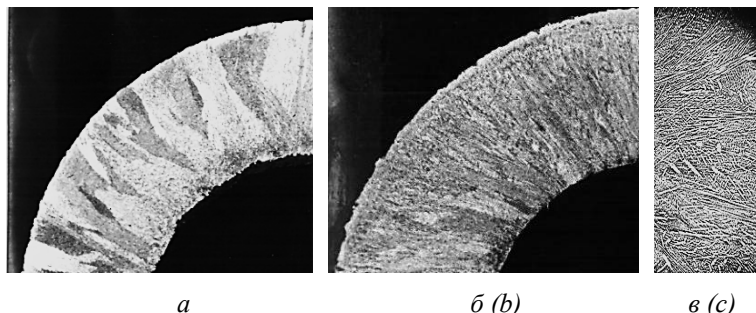


Рис. 3. Транскристаллитная макроструктура центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 при температуре заливки расплава 1 550 °C (а), 1 500 °C (б) и 1 450 °C (в) / Fig. 3. Transcrystalline macrostructure of centrifugal pipe casting of steel 40H25N20C2 at temperature of priming of melt  $t_{prim} = 1\ 550\ ^\circ\text{C}$  (a),  $1\ 500\ ^\circ\text{C}$  (b) и  $1\ 450\ ^\circ\text{C}$  (c)

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.

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. 3).

Установлено, что температура заливки расплава  $t_{зал}$ , обеспечивающая столбчатую структуру отливки, находится в пределах 1 500...1 600 °C при степени перегрева 100...200 °C (табл. 3). Для обеспечения повышенных механических характеристик необходимо получение тонко разветвленной транскристаллитной макроструктуры центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 необходимы температуре заливки расплава  $t_{зал} = 1\ 500\ ^\circ\text{C}$ , степени перегрева расплава  $\Delta t_{пер} = 100\ ^\circ\text{C}$ .

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 большого 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 жидкого сильно перегретого расплава к фронту кристаллизации, имеющего температуру кристаллизации стали.

Таблица 3

**Влияние степени перегрева расплава  $\Delta t_{пер}$  на макроструктуру и механические свойства центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2 / The influence of the degree of superheat of the melt  $\Delta t_{пер}$  on macrostructure and mechanical properties of centrifugal casting of steel pipes 40X25H20C2**

$\Delta t_{пер},\ ^\circ\text{C}$	Макроструктура (протяженность зоны столбчатых кристаллов, мм)	Механические свойства			
		$\sigma_B, \text{ МПа}$	$\sigma_T, \text{ МПа}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$
1	2	3	4	5	6
150	Грубые столбчатые кристаллы	535	330	22,1	16,6



Окончание таблицы 3					
1	2	3	4	5	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

Важным фактором, влияющим на макроструктуру центробежнолитых труб из стали 40Х25Н20С2, является и скорость вращения изложницы  $V$ . В то же время, скорость вращения изложницы слабее влияет на формирование зон кристаллизации при затвердевании отливки, чем температура заливки расплава. Влияние величины  $V$ , определяющей относительное движение расплава в изложнице после заливки, проявляется благодаря воздействию силового поля центробежных сил, возрастающих с увеличением числа оборотов изложницы.

Кристаллизация стали 40Х25Н20С2 в случае быстрого вращения изложницы с постоянной угловой скоростью происходит в условиях относительного покоя расплава, так как в этом случае он сразу же после заливки приобретает угловую скорость вращения изложницы. Макроструктура таких отливок характеризуется высокой плотностью. Это является, прежде всего, результатом

кристаллизации под давлением, вызываемым силовым полем центробежных сил [1; 2; 7]. Под действием последних формирующиеся кристаллы аустенита испытывают при кристаллизации значительную деформацию, выявляемую по плотности дефектов кристаллического строения и изменению формы зерен [8–13]. Уменьшение скорости вращения изложницы до значений, близких к критическому, усиливает относительное движение расплава по отношению к форме, что способствует уменьшению протяженности зоны столбчатых кристаллов [1; 2].

Изменение скорости вращения изложницы в интервале 1 200...1 500 об./мин. при неизменной температуре заливки расплава и одинаковом теплоизоляционном покрытии поверхности формы существенно не изменяет макроструктуру отливки (рис. 4 а, б).

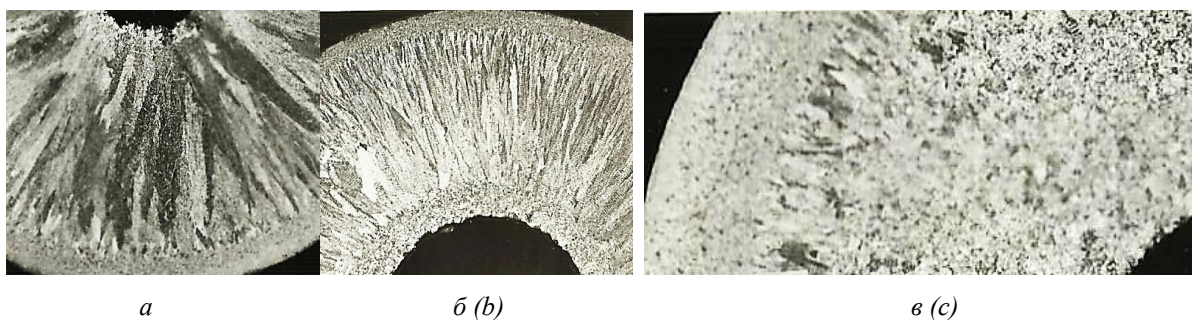


Рис. 4. Макроструктура центробежнолитых труб из стали 40Х25Н20С2 в зависимости от скорости вращения изложницы  $V$ : а –  $t_{зал} = 1\ 550\ ^\circ\text{C}$ ,  $V = 1\ 500$  об./мин.; б –  $t_{зал} = 1\ 550\ ^\circ\text{C}$ ,  $V = 1\ 200$  об./мин.; в –  $t_{зал} = 1\ 450\ ^\circ\text{C}$ ,  $V = 900$  об./мин. /Fig. 4. Macrostructure of centrifugal pipe casting of steel 40H25N20C2 depending on the speed of casting form rotation  $V$ : а –  $t_{prim} = 1\ 550\ ^\circ\text{C}$ ,  $V = 1\ 500$  turn/min; б –  $t_{prim} = 1\ 550\ ^\circ\text{C}$ ,  $V = 1\ 200$  turn/min; в –  $t_{prim} = 1\ 450\ ^\circ\text{C}$ ,  $V = 900$  turn/min

Наименьшая склонность к трансформации получается при сочетании низкой температуры заливки расплава и относительно малой скорости вращения изложницы (рис. 4 в). Изменение скорости вращения изложницы от 1 500 до 900 об./мин. (при прочих равных условиях) не вызывает значительного изменения макроструктуры трубной заготовки. Однако понижение температуры заливки расплава  $t_{\text{зал}}$  в изложницу при неизменных других технологических параметрах литья заметно снижает склонность стали 40X25H20C2 к трансформации и увеличивает зону равноосных кристаллов по наружной поверхности заготовки. Сочетание небольшой скорости вращения изложницы 900 об./мин. с низкой температурой заливки расплава позволяет получить отливку из

стали 40X25H20C2 с макроструктурой, в которой зона трансформации выражена слабо или практически отсутствует.

### Выводы

Для обеспечения повышенных механических характеристик необходимо получение тонко разветвленной трансформитной макроструктуры центробежнолитых труб из стали 40X25H20C2. Такую макроструктуру можно получить при следующих технологических параметрах центробежного литья: температуре заливки расплава  $t_{\text{зал}} = 1\ 500\ ^\circ\text{C}$ , степень перегрева расплава  $\Delta t_{\text{пер}} = 100\ ^\circ\text{C}$ , скорость вращения изложницы 1 200...1 500 об./мин.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Центробежное литье : монография / [С. Б. Юдин, М. М. Левин, С. Е. Розенфельд]. – Москва : Машиностроение, 1972. – 415 с. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/443757/>
2. Специальные виды литья : монография / [Ю. А. Степанов, М. Г. Анучина, Г. Ф. Баландин, Л. С. Константинов]. – Москва : Машиностроение, 1970. – 224 с. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/1656405/>
3. Саратовкин Д. Д. Дендритная кристаллизация : монография / Д. Д. Саратовкин. – Москва : Metallurgizdat, 1953. – 176с. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/968019/>
4. Соловьев Ю. Г. Центробежное литье – прогрессивный метод производства стальных труб и трубных заготовок : монография / Ю. Г. Соловьев. – Москва : ВНИТИ, 1968. – 303 с. – Режим доступа : <http://search.rsl.ru/record/01006075051>
5. Губенко С. И. Торможение межзеренного разрушения центробежнолитой стали 40X25H20C2 вторичными границами / С. И. Губенко, Ю. И. Балева // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 2 (273). – С. 2–8. – Режим доступа : [http://ptima.kiev.ua/index.php?option=com\\_content&task=view&id=343&Itemid=68&lang=ru](http://ptima.kiev.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=343&Itemid=68&lang=ru)
6. Губенко С. И. Неметаллические включения в центробежнолитой стали 40X25H20C2 / С. И. Губенко, В. Н. Беспалько, В. В. Юрковский, Ю. И. Балева // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 4. – С. 13–17. – Режим доступа : [http://ptima.kiev.ua/index.php?option=com\\_content&task=view&id=349&Itemid=68&lang=ru](http://ptima.kiev.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=349&Itemid=68&lang=ru)
7. Идельчик И. Е. Гидравлическое сопротивление : монография / И. Е. Идельчик. – Ленинград : Госэнергоиздат, 1954. – 221 с. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/881578/>
8. Рулла Н. В. Производство труб / Н. В. Рулла, Г. М. Самойлов, М. М. Студинский // Сб. статей по теории и практике трубного производства. – Москва, 1961. – Вып. 4. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/55095/>
9. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений / С. И. Губенко. – Днепропетровск : НметАУ, ИЦ «Системные технологии», 2014. – С. 01. – Режим доступа : <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 : монография / Б. А. Мовчан. – Киев : Техника, 1970. – 212 с. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/1055556/>
11. Дендритная ликвация в сталях и сплавах : монография / [И. Н. Голиков, С. Б. Масленков]. – Москва : Metallurgiya, 1977. – 224 с. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/1980026/>
12. Саратовкин Д. Д. Дендритная кристаллизация : монография / Д. Д. Саратовкин. – Москва : Metallurgizdat, 1957. – 125 с. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/968019/>
13. Явойский В. И. Теория процессов производства стали : монография / В. И. Явойский. – Москва : Metallurgizdat, 1963. – 820 с. – Режим доступа : <http://ntb.misis.ru:591/OpacUnicode/index.php?url=/notices/index/IdNotice:421394/Source:default>

### REFERENCES

1. Yudin S.B., Levin M.M. and Rozenfeld S.E. *Tsentrobeznoye lityo* [Centrifugal casting]. Moscow : Mashinostroenie, 1972, 415 p. (in Russian).
2. Stepanov Yu.A., Anuchina M.G., Balandin G.F. and Konstantinov L.S. *Spetsialnyie vidy litya* [Special types of casting]. Moscow : Mashinostroenie, 1970, 224 p. (in Russian).
3. Sarotovkin D.D. *Dendritnaya kristallizatsiya* [Dendritic crystallization]. Moscow : Metallurgizdat, 1953, 176 p. (in Russian).
4. Yu.G. Solovyov. *Tsentrobeznoye lityo – progressivnyy metod proizvodstva stalnykh trub i trubnykh zagotovok* [Centrifugal casting – advanced method of manufacturing steel tubes and tubular blanks]. Moscow : VNITI, 1968, 303 p. (in Ukrainian).
5. Gubenko S.I. and Baleva Yu.I. *Tormozheniye mezherennogo razrusheniya tsentrobezhnolitoi stali 40Cr25Ni20Si2 vtorichnymi granitsami* [Inhibition of intergranular failure tsentrobezhnolityh steel 40X25H20C2 secondary boundaries]. *Metal i lityo Ukrainy* [Metal Casting of Ukraine]. 2016, no. 2 (273), pp. 2–8. (in Russian).
6. Gubenko S.I., Bepalko V.N., Yurkovskiy V.V. and Baleva Yu.I. *Nemetallicheskiye vklucheniya v tsentrobezhnolitoi stali 40Cr25Ni20Si2* [Non-metallic inclusions in steel tsentrobezhnolityh 40Cr25Ni20Si2]. *Metal i litye Ukrainy* [Metal Casting of Ukraine]. 2016, no. 4, pp. 13–17. (in Russian).
7. Idelchik I.E. *Gidravlicheskiye soprotivleniye* [Hydraulic resistance]. Leningrad : Gosenergoizdat, 1954, 221 p. (in Russian).

8. Rulla N.V., Samoylov G.M. and Studinskiy M.M. *Proizvodstvo trub* [The production of pipes]. *Sbornik statey po teorii i praktike trubnogo proizvodstva* [Collection of articles on the theory and practice of pipe production]. Moscow, 1961, vol. 4. (in Russian).
9. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vkhlyucheniy* [Physics of fracture steel near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NmetAU, IT «Sistemnyye tekhnologii», 2014, 01 p. (in Russian).
10. Movchan B.A. *Granitsy kristallitov v litykh metallakh i splavakh* [The boundaries of the crystallites in cast metals and alloys]. Kyiv : Tekhnika, 1970, 212 p. (in Russian).
11. Golikov I.N. and Maslenkov S.B. *Dendritnaya likvatsiya v stalyakh i splavakh* [Dendritic liquation in steels and alloys]. Moscow : Metallurgiya, 1977, 224 p. (in Russian).
12. Saratovkin D.D. *Dendritnaya kristallizatsiya* [Dendritic crystallization]. Moscow : Metallurgizdat, 1957, 125 p. (in Russian).
13. Yavoyskiy V.I. *Teoriya protsessov proizvodstva stali* [Theory of steel-making processes]. Moscow : Metallurgizdat, 1963, 820 p. (in Russian).

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушевой (Украина), д-ром техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлиным (Украина).*

Поступила в редколлегию 25.02.2017

Принята в печать 28.02.2017

УДК 669.017:62-405.8

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ИХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В АТМОСФЕРЕ ВОДОРОДА

КАРПОВ В. Ю.<sup>1\*</sup>, *д. т. н., проф.*,  
КАРПОВ В. В.<sup>2</sup>  
КОМИССАРЧУК О. В.<sup>3</sup>, *аспир.*

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (067) 921-93-80, e-mail: [vladkarp@mail.ru](mailto:vladkarp@mail.ru)

<sup>2</sup> Научно-исследовательская лаборатория «Сплав», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (067) 921-93-80, e-mail: [vladkarp@mail.ru](mailto:vladkarp@mail.ru)

<sup>3</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (067) 921-93-80

**Аннотация. Постановка проблемы.** Проблема формирования пористой структуры в литых металлах связана с необходимостью сокращать количество материалов для изготовления изделий при сохранении всех их параметров кроме веса. **Цель статьи** – определение основных параметров процесса изготовления газаров при нескольких центрах кристаллизации. **Методика.** Материалом для исследований служила медь марки М0, которая обрабатывалась в экспериментальной установке с использованием специальных форм с несколькими центрами кристаллизации. Использовались методы исследования – макро- и микроанализ, измерение пористости, определение параметров для получения минимального количества дефектов структуры. **Результаты.** Установлено, что при двух фронтах кристаллизации (аксиальном и радиальном) образцы газаров имеют достаточно однородную структуру, параметры которой зависят от условий процесса получения. Величину пористости и размеры пор можно изменять давлениями насыщения и кристаллизации, степенью теплового контакта с холодильниками. При двух встречных фронтах кристаллизации структура полученных образцов значительно отличается от предыдущей серии. Влияние давлений насыщения и кристаллизации на структуру аналогично, но требуются их более высокие значения для получения однородной структуры. **Научная новизна.** Установлены основные закономерности формирования структуры газаров при двух фронтах кристаллизации различно ориентированных относительно друг друга. Проанализированы дефекты структуры, причины их появления и способы их устранения. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов позволит получать изделия сложной формы с заранее запланированной структурой и свойствами при конкретных параметрах процесса.

*Ключевые слова:* давление насыщения; кристаллизация; холодильник; пористость; однородность структуры

## СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В МЕТАЛАХ ЗА ЇХ КРИСТАЛІЗАЦІЇ В АТМОСФЕРІ ВОДНЮ

КАРПОВ В. Ю.<sup>1\*</sup>, *д. т. н., проф.*,  
КАРПОВ В. В.<sup>2</sup>  
КОМИССАРЧУК О. В.<sup>3</sup>, *аспир.*