

С. И. Губенко, В. Н. Беспалько, В. В. Юрковский\*, Ю. И. Балева

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

\*ОАО НПО «Трубоасталь», Никополь

## Неметаллические включения в центробежнолитой стали 40X25H20C2

Обсуждаются основные виды и распределение неметаллических включений в центробежнолитой стали 40X25H20C2. Показано их влияние на образование дефектов. Исследованы источники и механизм формирования трещин вблизи включений.

**Ключевые слова:** центробежнолитая сталь, трещины, неметаллические включения

**В**ведение. Неметаллические включения могут оказывать влияние на локальные процессы формирования структуры стали, но также могут быть причиной образования различного рода дефектов, снижающих качество отливок и труб. Включения в центробежнолитых сталях изучены недостаточно полно [1], поэтому необходимо исследовать основные виды и распределение неметаллических включений в центробежнолитой стали 40X25H20C2 и показать их влияние на локальные процессы формирования дефектов вблизи включений, что и явилось целью настоящей работы.

**Материалы и методики исследований.** Исследованы неметаллические включения в трубных заготовках из стали 40X25H20C2, полученных на горизонтальных машинах центробежного литья. Для исследования неметаллических включений проводили отбор металла соответственно 5, 30, 70 и 95 % от наружной поверхности отливки. Идентификацию не-

металлических включений проводили несколькими методами: металлографическим («Neophot-21»); петрографическим; микрорентгеноспектральным (MS-46); рентгеноструктурным (ДРОН-2,0).

**Результаты исследований и их обсуждение.** Макроструктурный анализ отливок показал, что вблизи наружной поверхности часто присутствовали вкрапления песка глубиной до 2...3 мм, вблизи внутренней поверхности нередко наблюдали рыхлость глубиной до 3...5 мм. В этих зонах присутствовали различные неметаллические включения как экзогенного, так и эндогенного происхождения.

В отливках из стали 40X25H20C2 в случаях использования в качестве покрытия внутренней поверхности изложницы песчаных смесей встречаются участки с грубыми экзогенными включениями (рис. 1, а). Анализ показал, что это частички песка, представляющие собой сложные многофазные силикатные включения (рис. 1, в). Очевидно, присутствие

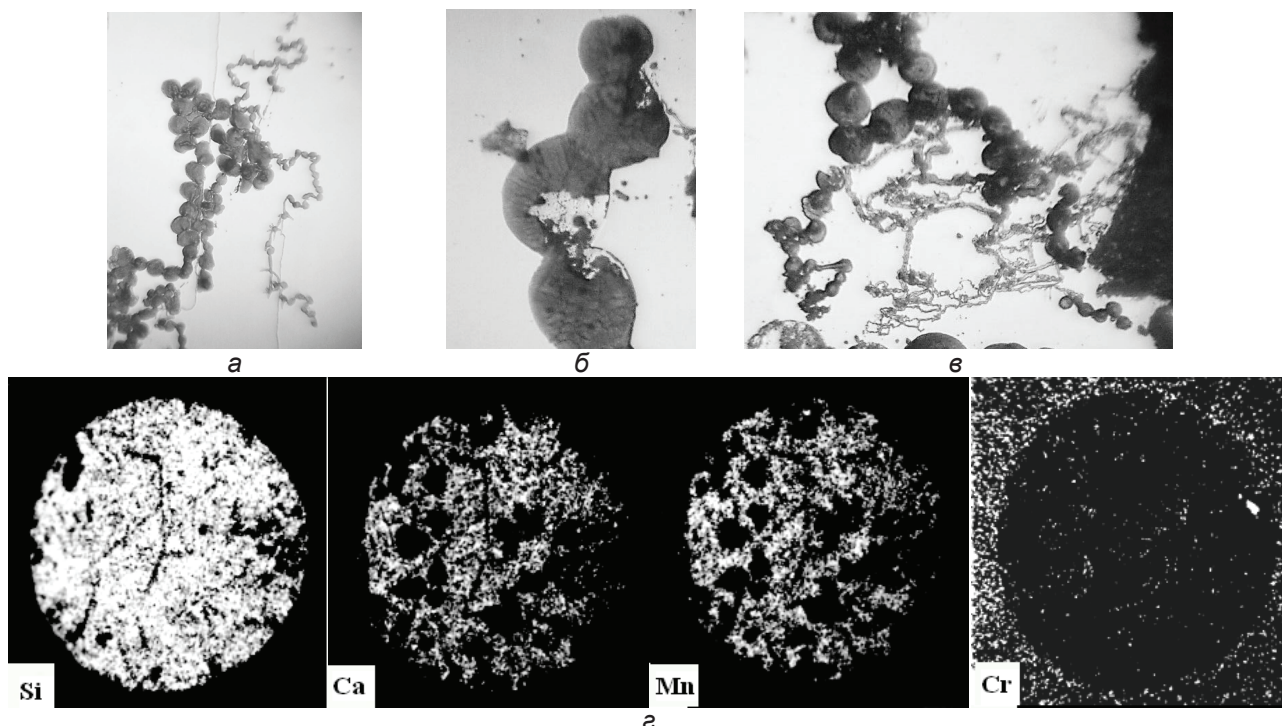


Рис. 1. Экзогенные включения в центробежнолитой стали 40X25H20C2, x500

экзогенных включений снижает качество центробежнолитой заготовки, поскольку грубые включения являются концентраторами значительных напряжений [2]. Частицы песчаной смеси взаимодействуют друг с другом в расплаве, происходит их трение друг относительно друга, что приводит к возникновению в них внутренних напряжений и разрушению включений (рис. 1, б). Разрушение происходило как в поверхностных слоях частиц, так и в результате образования транскристаллитных хрупких трещин по границам фаз включений. Вблизи скоплений экзогенных включений наблюдали также грубые трещины кристаллизационного происхождения (рис. 1, в) [1]. Их появление обусловлено тем, что эти грубые частицы являются концентраторами термических напряжений в стали, величина которых зависит от размера включения [2]. Поскольку в процессе непрерывного охлаждения уровень таких напряжений постоянно возрастает, а их релаксация путём микросдвигов в окружающей стальной матрице затруднена, поэтому происходит их релаксация в хрупкие трещины.

Исследовали эндогенные неметаллические включения в центробежнолитой стали 40X25H20C2: оксиды и шпинели  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $MnO \cdot Al_2O_3$ ,  $(MnFe)O$ ,  $(Ce,Al)_2O_3$  (рис. 2, а), силикаты – глобулярные  $SiO_2$  (рис. 2, б) и  $FeO \cdot SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$  (рис. 2, в), карбонитриды и оксиды титана TiCN (рис. 2, г) а также железо-марганцевые сульфиды с различным соотношением железа и марганца  $(Mn,Fe)S$  (рис. 2, д), а также сульфиды с церием  $(Mn,Ce)S$  (рис. 2, е). Кроме того обнаружены гетерофазные оксисульфидные и окси-силикатные включения (рис. 2, ж). Следует отметить, что неметаллические включения неравномерно распределены в стали. При этом можно различать два типа этой неравномерности: в объёме отливки и в пределах дендритной структуры.

Проанализировано распределение включений в пределах дендритной структуры отливки (рис. 3, а).

Такое неравномерное распределение включений свидетельствует о возникновении турбулентных потоков, которые обусловлены движением расплава в тангенциальном и осевом направлениях, что в результате образует сложный характер его перемещения относительно формы по винтовой траектории [1]. Гидравлические явления, происходящие в расплаве, способствуют локальным турбулентным процессам, что способствует изгибу дендритов либо отдельных их ветвей в процессе роста и как следствие, к перераспределению включений. Неоднородному распределению включений способствуют ликвационные явления в расплаве, а также образование включений вследствие локальных многофазных превращений в процессе многофазной кристаллизации, например, при эвтектическом либо монотектическом превращении (рис. 3, б, в) [2].

Известно, что в процессе выплавки центробежнолитых сталей происходит всплывание включений, которые вращаются вместе с расплавом под действием силы гидростатического давления [1]. В результате включения всплывают в направлении от наружной к внутренней зонам расплава. Подъёмная сила, действующая на включение, которое вращается вместе с расплавом, является равнодействующей элементарных подъёмных сил и приложена в центре сил инерции вытесненного объёма жидкости [1]. Согласно работе [1] силы, действующие на включение, находящееся во вращающемся расплаве, возрастают в 30...100 раз по сравнению с таковыми в случае неподвижной системы. Таким образом, силы всплывания включений в условиях центробежного литья значительно увеличиваются.

Подъёмная сила  $P_{\text{ц}}$  пропорциональна  $(\gamma_{\text{в}} - \gamma_{\text{м}})$  [1]. Чем больше величина разности  $(\gamma_{\text{в}} - \gamma_{\text{м}})$ , тем больше подъёмная сила, действующая на включение. Очевидно, на способность включения всплывать в расплаве также оказывает влияние уровень его

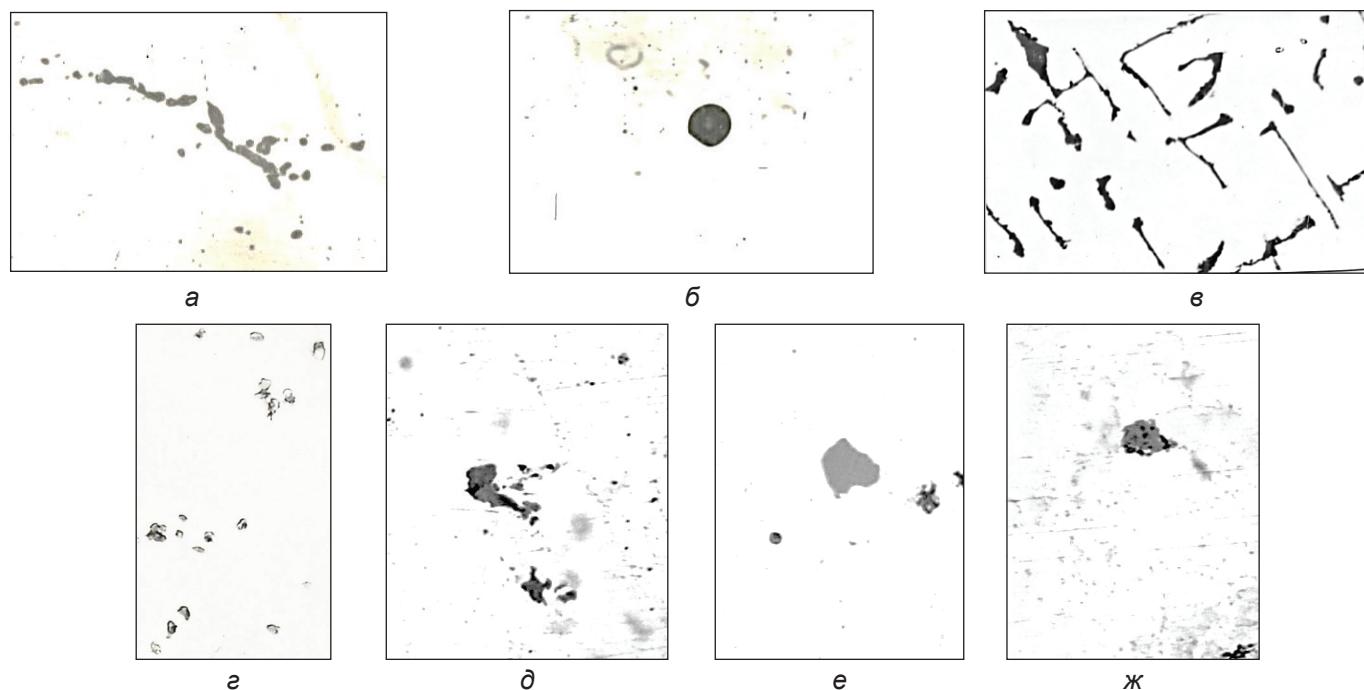


Рис. 2. Эндогенные неметаллические включения в центробежнолитой стали 40X25H20C2, x500

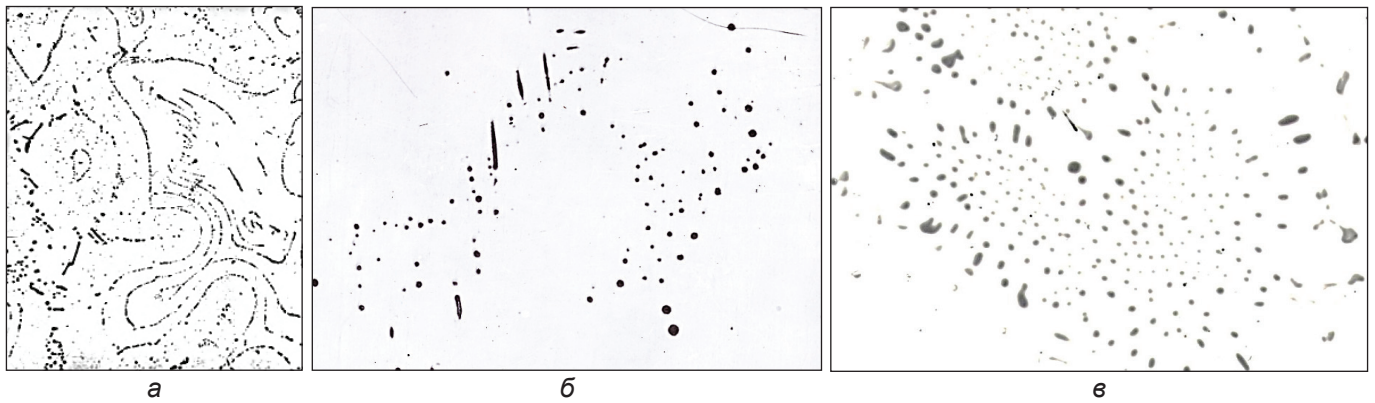


Рис. 3. Распределение эндогенных включений в дендритной структуре в центробежнолитой стали 40X25H20C2, x100 (а), x200 (б, в)

смачиваемости жидкой сталью [2], а также характер конвекционных потоков, реализующихся в условиях центробежного литья. Количественный анализ распределения включений различных типов в объеме отливки показал, что наружные слои заготовки содержат значительно меньше включений, чем внутренние и это различие составляет 2...4 раза в разных плавках (табл. 1). Следует отметить, что по сечению отливки изменяется не только общее содержание неметаллических включений, но также их количественное соотношение по типам (табл. 2).

Изучали изменение объемной доли включений на расстоянии соответственно 5, 30, 70 и 95 % от наружной поверхности заготовки. Исследование показало, что в направлении от наружной к внутренней стенке отливки существенно возрастает доля включений глобулярных силикатов  $\text{SiO}_2$  по сравнению с иными тугоплавкими включениями  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Ce,Al})_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiCN}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , доля которых наоборот уменьшается. Очевидно, это связано с различной способностью к всплыванию тугоплавких включений, которая максимальна у включений  $\text{SiO}_2$  [1]. Сульфидные

включения имеют меньшую способность к всплыванию, чем  $\text{SiO}_2$ , поэтому их относительное количество вблизи внутренней поверхности заготовки снижается на фоне поведения более «быстрых» включений, а также в связи с образованием в этих зонах легкоплавких силикатов  $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$  и  $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ . Таким образом, распределение различных типов неметаллических включений по сечению отливки определяется моментом их образования в стали, а также способностью к всплыванию во вращающемся расплаве.

Для внутренних зон отливок в местах скопления неметаллических включений характерно образование дефектов – трещин (рис. 4, а), которые связаны с присутствием грубых шлаковых включений. Кроме того, в этих же участках отливок возникают микротрещины в местах скопления эндогенных включений, которые имеют термическое происхождение (рис. 4, б, в) [2]. Чем больше содержание включений, тем больше глубина залегания этих дефектов (см. табл. 1). В то же время, поскольку в пределах заготовки эндогенные включения распределены неравномерно, в местах их скопления также возникают микротрещины (рис. 4, в).

Таблица 1

**Распределение неметаллических включений в пределах центробежнолитой заготовки из стали 40X25H20C2**

Номер плавки	Содержание включений		Глубина залегания дефектов, мм
	в наружных слоях заготовки (балл по ГОСТ 1778)	во внутренних слоях заготовки (балл по ГОСТ 1778)	
1266	0,5...1	2...4	3,3
1272	0,5	2...3	2,6
1282		1...2	3,0
1288	0,5...1	1...4	3,2
1290	1	2...4	4,3
1265	1...2		9,0

Таблица 2

**Относительное количество включений разных типов по сечению заготовки**

Место вырезки образца (%)	Объемная доля включений, об. %					
	$\text{SiO}$	$\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{MnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ $(\text{Ce,Al})_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{TiCN}$	$(\text{Mn,Fe})\text{S}$ $(\text{Mn,Ce})\text{S}$
5	9	0	25	14	29	23
30	21	0	20	12	27	20
70	29	15	10	10	20	16
95	35	32	10	5	6	12

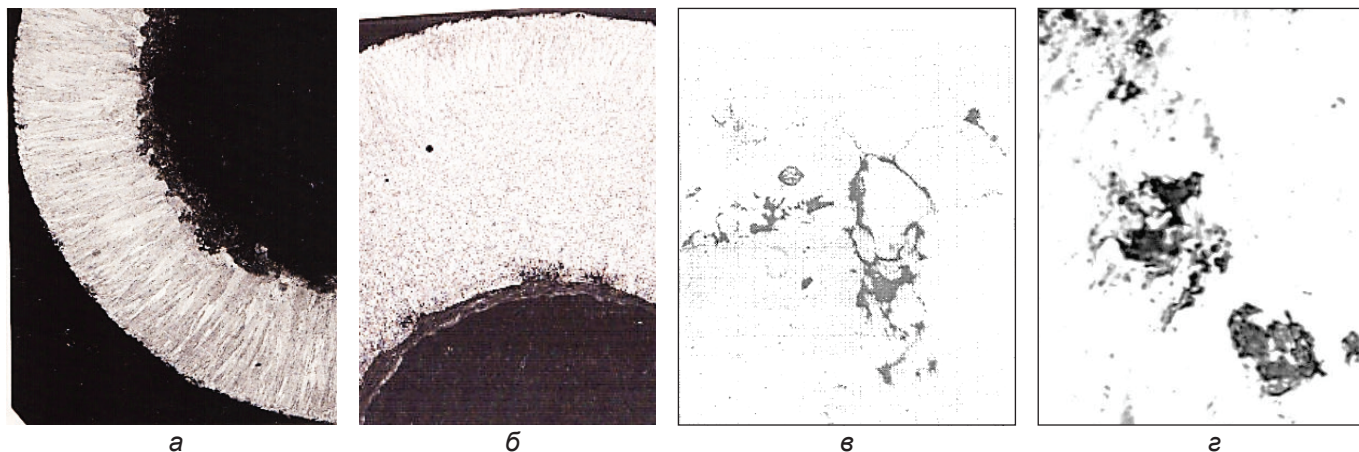


Рис. 4. Трещины вблизи внутренней поверхности заготовки в местах присутствия шлаковых (а) и эндогенных включений (б-г), х500 (в-г)

Таблица 3

### Механические свойства центробежнолитой стали 40Х25Н20С2

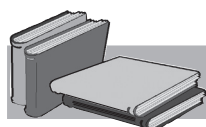
Место вырезки образца	Макроструктура	Содержание включений, балл по ГОСТ 1778	Механические свойства			
			$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{т}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
Внутренняя поверхность заготовки	столбчатая структура	2	535	310	18,5	19,3
		3...4	455	265	15,2	15,3
		3 + шлаковые включения	430	230	14,2	13,7
Наружная поверхность заготовки	смешанная	0,5	570	365	15,5	14,5
		0,5 + экзогенные включения (песок)	425	255	12,1	10,6

Механические испытания показали, что при одинаковой макроструктуре отливки неметаллические включения оказывают существенное негативное влияние на уровень прочностных и пластических характеристик (табл. 3).

#### Выводы

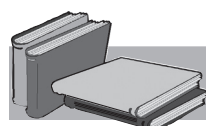
Неметаллические включения неравномерно распределены в различных зонах, а также в дендрит-

ной структуре заготовок из центробежнолитой стали 40Х25Н20С2, что обусловлено моментом их образования в стали, а также способностью к всплыванию во вращающемся расплаве. Присутствие экзогенных включений (частицы шлака и песчаной смеси) является причиной образования грубых трещин и рыхлости, что существенно снижает качество заготовок и является причиной снижения прочностных и пластических характеристик центробежнолитой стали 40Х25Н20С2.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Юдин С. Б. Центробежное литье / С. Б. Юдин, М. М. Левин, С. Е. Розенфельд. – М.: Машиностроение, 1972. – 415 с.
2. Губенко С. И. Неметаллические включения в стали / С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.



## REFERENCES

1. Judin S. B., Levin M. M., Rozenfel'd S. E. (1972). Centrobezhnoe lit'e [Centrifugal casting]. Moscow: Mashinostroenie, pp. 415. [in Russian].
2. Gubenko S. I., Parusov V. V., Derevjanchenko I. V. (2005). Nemetallicheskie vkljuchenija v stali [Non-metallic inclusions in steel]. Dnepropetrovsk: ART-PRESS, pp. 536. [in Russian].

---

**Анотація**

Губенко С. І., Беспалько В. Н., Юрковсткий В. В., Балева Ю. І.  
Неметалеві включення в центробіжнолитій сталі 40Х25Н20С2

*Розглянуто основні види та розподіл неметалевих включень в центробіжнолитій сталі 40Х25Н20С2. Показано їх вплив на зародження дефектів. Досліджено джерела та механізм формування тріщин навколо включень.*

**Ключові слова**

центробіжнолита сталь, тріщини, неметалеві включення

**Summary**

Gubenko S., Bepalko V., Yurkovstkiy V., Baleva Yu.  
Non-metal inclusions in centrifugal casted steel

*The principal types and distribution of non-metallic inclusions in centrifugal casting steel 40H25N20C2 are discussed. It was shown their influence on the defects formation. The sources and mechanism of cracks formation near inclusions was investigated.*

**Keywords**

centrifugal casting; cracks; non-metallic inclusions

Поступила 10.04.2016