

type of lasers has uniform heat input across the hardening strip width. In the laser hardening zone in the optimal mode, the steel has a martensite structure with a microhardness of ~7 500 MPa. The depth of the hardened layer is ~1.3 mm. The efficiency of using a multichannel CO<sub>2</sub> laser for hardening structural steel is shown.

*Keywords:* structural steel, laser hardening, multichannel laser, microstructure, martensite, microhardness.

Поступил в редакцию/received: 02.12.2024;  
после рецензирования/revised: 05.12.2024; принята/accepted: 10.12.2024

УДК 621.74.08

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК СТЕКЛОФОРМ

И.А. СМОЛЯКОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А.И. ИВАНОВА<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук,  
Л.Е. АФАНАСЬЕВА<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

<sup>2</sup>Тверской государственный университет  
170100, Тверь, ул. Желябова, 33, e-mail: alex.ivanova33@yandex.ru

© Смолякова И.А., Иванова А.И., Афанасьева Л.Е., 2025

Исследованы микроструктура, химический и фазовый состав заготовок серого чугуна для стеклоформ. Обоснована необходимость контроля фазового состава чугуна и формирования отдельных структурных составляющих в процессе послойного затвердевания отливки для обеспечения повышенных эксплуатационных свойств деталей формокомплекта, работающих в тяжелых условиях циклических термических нагрузок и абразивного износа.

*Ключевые слова:* стеклоформа, формокомплект, чугун, фазовый состав, микроструктура, микротвердость, износостойкость.

**DOI:10.46573/2658-5030-2025-1-24-31**

### ВВЕДЕНИЕ

Производство стеклоформующей оснастки, применяемой для массового выпуска стеклянной тары, относится к важным отраслям промышленности: формовую оснастку в нашей стране изготавливают более чем на 100 заводах [1, 2]. Однако в 2000...2010 годы конкуренция за рынки сбыта стеклоформующей оснастки обеспечила на территории России преимущество иностранным импортерам: использование оборудования, зависящего от деталей исключительно зарубежного производства, достигло 87 % [1]. К 2015 году доля отечественных производителей на рынке стеклоформующей оснастки составляла менее 15 % в денежном эквиваленте [1, 2].

Основным сдерживающим фактором является неэффективная технология изготовления изделий и, как следствие, низкий ресурс формовой оснастки. На каждом заводе используются свои технологические циклы, зачастую далекие от совершенства. Между тем от того, насколько качественно выполнено литье пресс-форм, зависит

стойкость формокомплекта. По доле выпуска чугунного литья Россия входит в тройку ведущих стран-производителей. Необходимо кардинальное переосмысление технологии производства деталей данного типа с учетом конкуренции с зарубежными поставщиками подобной продукции [1]. Для успешного решения данного вопроса в настоящий момент имеются все возможности.

Минимальной стоимостью обладают формы, ресурс которых составляет 200...400 тысяч термоциклов. Их изготавливают из экономно легированных чугунов. Формовые комплекты из чугуна, рабочие кромки которых дополнительно упрочняют нанесением износостойкого покрытия, выдерживают 400...550 тысяч термоциклов, однако их стоимость на 20...30 % выше. В настоящее время наблюдается интенсивный рост потребления стеклянной тары, что формирует спрос на высококачественную формовую оснастку, пригодную для эксплуатации на линии до 700...1 000 тысяч съемов при низких затратах на ее изготовление[3].

Формовой комплект для литья стеклотары обеспечивает получение конкретного изделия от капли расплавленного стекла с температурой около 1 200 °C до готовой продукции. Повышение стойкости литьевых пресс-форм относится к актуальным задачам, что обусловлено объемом и многообразием выпускаемой продукции [4–6].

Сроки эксплуатации стеклоформ, как правило, определяются износостойчивостью их рабочих поверхностей – формующей полости, острых кромок формующей полости и соприкасающихся поверхностей замка сцепления. Наибольшему износу (тепловому, абразивному, адгезионному, высокотемпературному окислительному, усталостному) подвержены рабочие кромки формующей полости стеклоизделий [7, 8].

Существуют следующие способы упрочнения стеклоформ: нанесение наплавочных материалов, диффузионное, электролитическое хромирование, никелирование и некоторые другие. Поскольку изнашиванию подвергаются относительно тонкие слои, в данном случае весьма эффективны поверхностные упрочнения, наплавки, покрытия. Перспективным вариантом получения литой заготовки является процесс затвердевания отливки с максимальным тепловым градиентом [9–12].

Цель настоящей статьи – комплексное исследование структуры серого чугуна, полученного литьем на металлический холодильник.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали образцы чугуна марки К250 с пластинчатым графитом производства фирмы Fonderie Valdelsane (Италия). Химический состав чугуна по данным изготовителя, % масс:

C – 3,55±0,10;  
Si – 2,0±0,20;  
Mn – 0,6±0,10;  
Cr – 0,15±0,05;  
Ni<0,2;  
Ti<0,2;  
S<0,05;  
P<0,1;  
Fe – основа.

Исследование микроструктуры выполняли с помощью оптического металлографического микроскопа CarlZeissAxioVert.A1MAT и электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV. Химический состав чугуна определяли методом рентгеноспектрального микроанализа с использованием энергодисперсионного спектрометра Oxford INCAEnergy 350.

Измерение микротвердости HV проводили на нетравленых шлифах методом восстановленного отпечатка согласно ГОСТ 9450-76 с помощью отечественного прибора ПМТ-3. Применяли индентор в виде алмазной пирамиды с углом при вершине 136°. Усилие на индентор составляло 1,96 Н (200 г).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При литье чугуна на холодильник возможно управлять интенсивностью теплообмена между отливкой и формой, обеспечивая в поверхностных слоях высокую скорость охлаждения расплава и формирование градиентной микроструктуры высокой дисперсности[12]. На рис. 1 даны полученные при разных увеличениях изображения микроструктуры чугуна вблизи стеклоформующей поверхности.

При послойном затвердевании отливки от стеклоформующей поверхности на глубине до 400 мкм формируется мелкодисперсная микроструктура. Фазовый состав чугуна – феррит и эвтектика с включениями графита размером 1...3 мкм. При малом увеличении этот участок выглядит в виде светлой полосы в верхней левой части рис. 1 (этот слой будем называть первым). Далее располагается слой чугуна с мелкопластинчатым графитом толщиной 12...14 мм (второй слой). Размер графитовых включений увеличивается до 35...40 мкм. Металлическая основа чугуна – феррит, содержание перлита составляет до 5 %.

Несмотря на значительное различие в размере и распределении графитовых включений (рис. 2), микротвердость в первом и втором слое одинакова, около  $205 \pm 5$  HV. Это подтверждает, что отбела чугуна в первом слое нет.

С удалением от стеклоформующей поверхности на расстояние более 14 мм размер графитовых включений начинает увеличиваться (рис. 3). На расстоянии 25 мм от стеклоформующей поверхности графитовые пластинки достигают около 200 мкм, микротвердость по сравнению с первым и вторым слоями становится ниже ( $190 \pm 20$  HV).

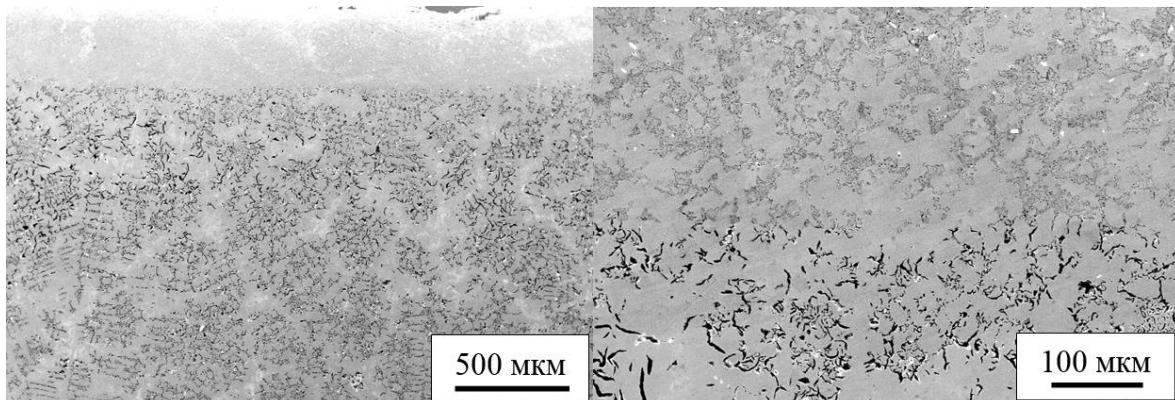


Рис. 1. Микроструктура чугуна вблизи стеклоформующей поверхности.  
Растровая электронная микроскопия

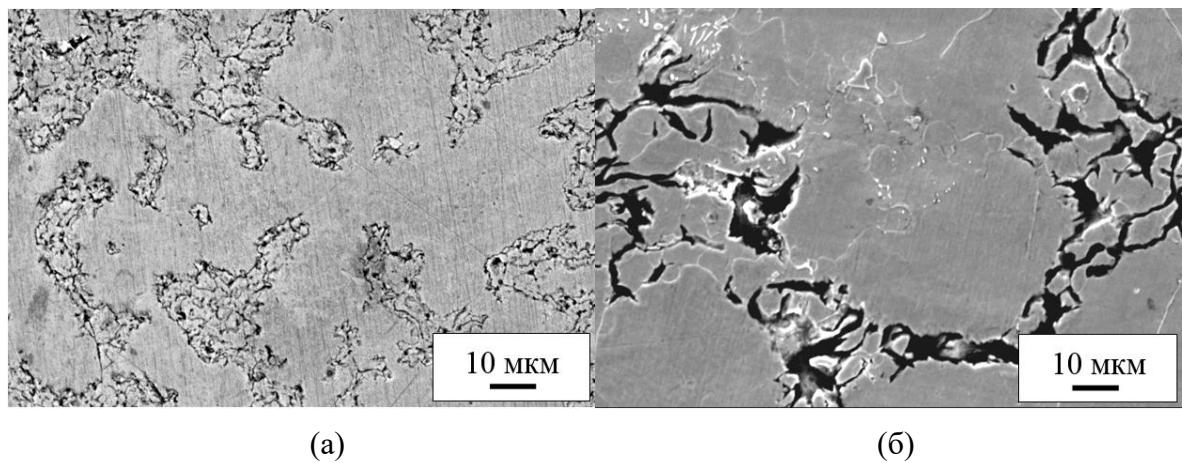


Рис. 2. Микроструктура чугуна в первом (а) и во втором (б) слое.  
Растровая электронная микроскопия

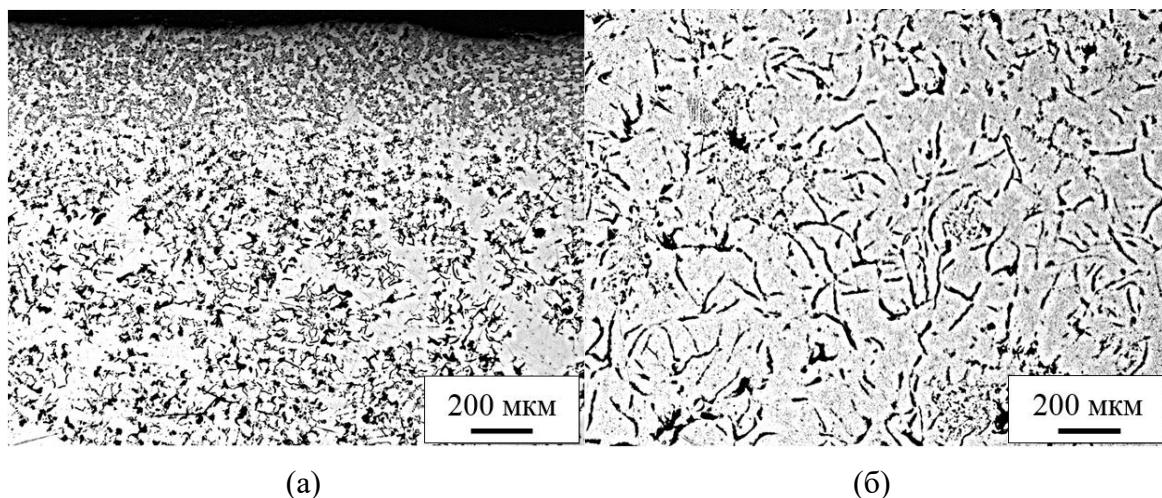


Рис. 3. Микроструктура чугуна вблизи стеклоформующей поверхности (а)  
и на расстоянии 25 мм (б). Нетравленый шлиф. Оптическая микроскопия.

На рис. 4 и 5 представлены результаты рентгеноспектрального микроанализа, выполненного вблизи стеклоформующей поверхности. Химический состав чугуна определяли на восьми разных участках. Спектр 1 – усредненный по полю зрения (выделен большим прямоугольником). Выявлены кислород, кремний, марганец, углерод и железо. Распределение химических элементов по спектрам, % масс, приведено ниже:

№ спектра	C	O	Al	Si	V	Mn	Fe	Mo
1	7,6	4,1	–	2,2	–	0,6	85,6	–
2	6,4	–	–	1,5	–	0,7	91,4	–
3	6,8	–	–	1,5	–	0,4	91,3	–
4	6,3	6,8	–	2,4	–	2,0	82,5	–
5	7,5	5,7	–	2,6	–	0,5	83,6	–
6	7,1	50,1	40,3	–	–	–	2,5	–
7	9,6	41,9	28,5	0,4	–	–	19,5	–
8	12,4	–	–	1,5	0,6	0,4	81,1	4,0

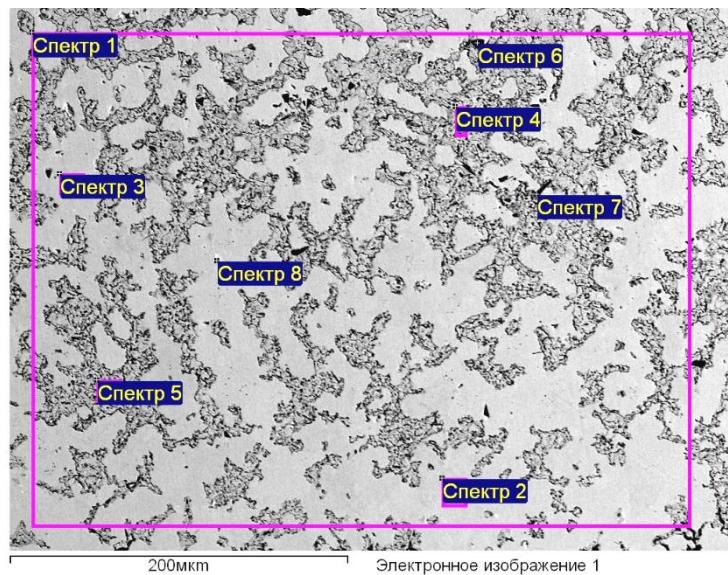


Рис. 4. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности чугуна: электронно-микроскопический снимок, прямоугольниками обозначены зоны микроанализа

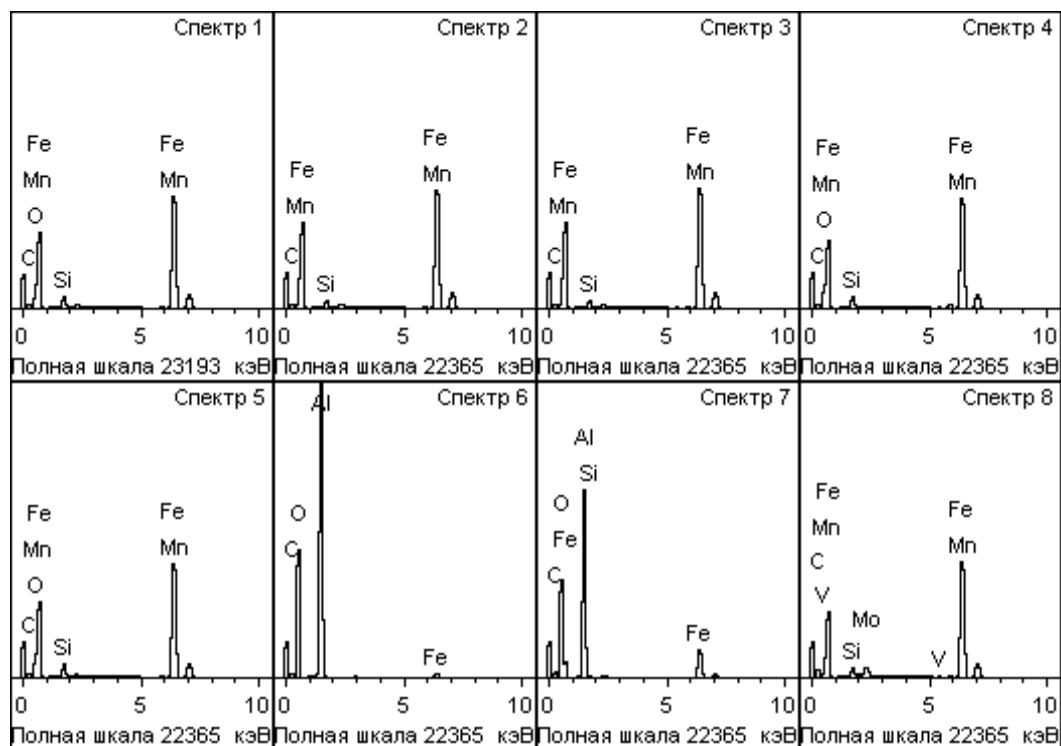


Рис. 5. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности чугуна: спектры исследуемых участков

Остальные участки локальные. Спектры 2 и 3 показывают химический состав металлической матрицы – феррита, 4 и 5 – эвтектики. Спектры 6 и 7 (черные точки на шлифе), вероятно, являются оксидами алюминия. Спектр 8 показывает распределение элементов в сложнолегированном карбиде, содержащем молибден и ванадий (белое включение на поверхности шлифа).

На рис. 6 и 7 представлены результаты рентгеноспектрального микроанализа участка, расположенного на расстоянии 5 мм от стеклоформующей поверхности. Участок обозначен как «Спектр 1» и выделен прямоугольником. Выявлены углерод, кремний, марганец и железо. Распределение массового содержания химических элементов показано ниже:

Элемент	C	Si	Mn	Fe
% масс	19,6	1,6	0,6	78,2

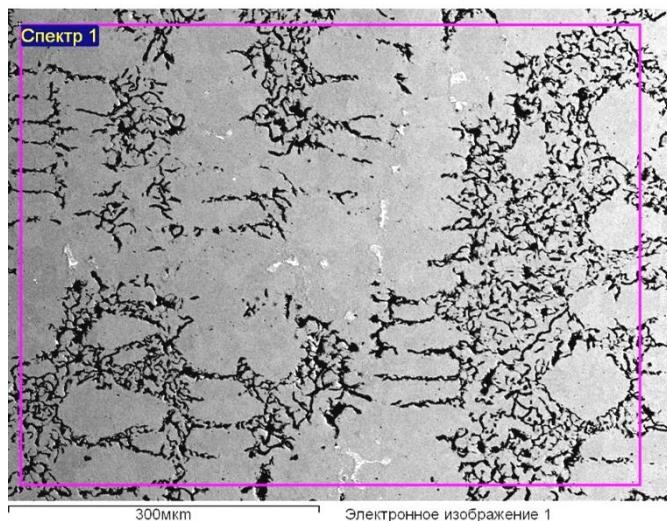


Рис. 6. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности чугуна:  
электронно-микроскопический снимок

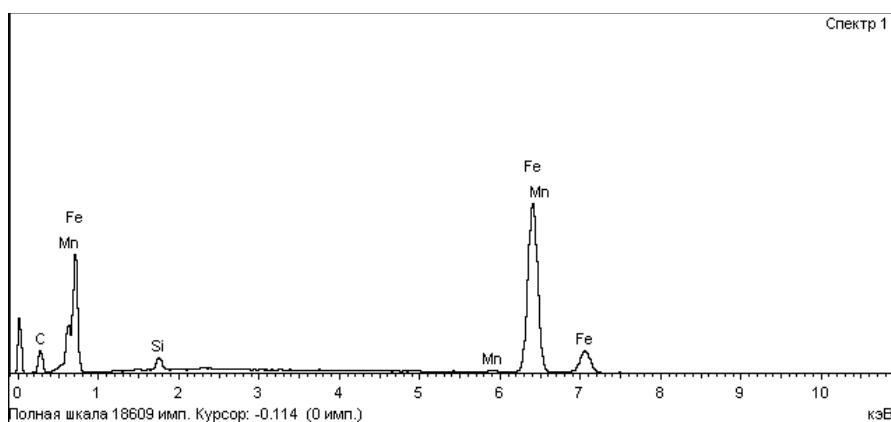


Рис. 7. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности чугуна:  
спектр исследуемого участка

Первый показатель, определяющий стойкость стеклоформ, – микроструктура чугуна на глубине до 15 мм, которая соответствует зоне рабочего слоя формы после механической обработки. Необходимо получение на рабочей поверхности стеклоформ очень мелкого и однородного графита с целью улучшения обрабатываемости, полировки поверхности и повышения трещиностойкости металлоформ при циклическом воздействии высоких температур [11, 12].

Другим показателем, определяющим теплопроводность и отсутствие коробления форм, является микроструктура чугуна на глубине 25...40 мм. Основное требование, предъявляемое к структуре слоев на таких глубинах в отливках для деталей стеклоформ, состоит в наличии крупных включений графита, обеспечивающих высокую теплопроводность и, соответственно, пониженные термические напряжения в эксплуатируемых деталях [12]. Теплопроводность повышается также с увеличением количества феррита в структуре матрицы чугуна, что обуславливает применение для деталей такого типа именно ферритной металлической основы [12].

Литье чугуна на холодильник позволяет сформировать в отливке слоистую микроструктуру с требуемым распределением структурных и фазовых компонентов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены металлографические исследования отливки серого чугуна для стеклоформ. Образцы имеют слоистое строение. Вблизи стеклоформующей поверхности на глубине до 400 мкм формируется ультрадисперсная микроструктура с графитовыми пластинками размером 1...3 мкм. Затем в рабочем слое толщиной до 14 мм от стеклоформующей поверхности размер графитовых включений возрастает до 35...40 мкм. Чугун имеет ферритную металлическую основу. Микротвердость чугуна вблизи стеклоформующей поверхности и на расстоянии 14 мм от нее одинакова и составляет около  $205 \pm 5$  HV. На расстоянии 25 мм от стеклоформующей поверхности микротвердость ниже ( $190 \pm 20$  HV). Размер графитовых пластинок достигает 200 мкм.

Благодаря более интенсивному охлаждению внутреннего слоя литьей заготовки, при литье чугуна на холодильник существенно повышается дисперсность структурных составляющих на кромках рабочих поверхностей, что должно положительно сказаться как на теплостойкости, так и на износостойкости изделия. Получение литьей заготовки в процессе затвердевания отливки с максимальным тепловым градиентом является весьма перспективным направлением при изготовлении чугунных формокомплектов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Металлографические исследования выполнены с использованием оборудования научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Медяник Н.Л., Чупрова Л.В., Куликова Т.М., Одуд З.З. Производство стекла и стеклянной тары. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2005. 163 с.
2. Леушин И.О., Чистяков Д.Г., Нищенков А.В. Анализ технологии производства стеклоформующей оснастки на отечественных предприятиях // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 4 (115). С. 184–191.
3. Леушин И.О., Чистяков Д.Г. Влияние структурообразования и фазового состава чугунных отливок стеклоформ на эксплуатационные свойства готовых изделий // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2015. Т. 56. № 5. С. 19–23.
4. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Измайлова В.В., Барчуков Д.А. Исследование триботехнических свойств поверхностей, полученных воздействием концентрированных потоков энергии. Тверь: ТвГТУ, 2022. 164 с.

5. Шлегель А.Н. Повышение стойкости рабочих кромок чугунных стеклоформ на основе лазерного непрерывного упрочнения: дис. ... канд. техн. наук. Владимир. 2011. 185 с.
6. Раткевич Г.В., Ботянов Е.В., Лаврентьев Е.А. Растворная электронная микроскопия чугуна для стеклоформ // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика. 2011. № 15. С. 44–50.
7. Леушин И.О., Зиновьев Ю.А., Чистяков Д.Г. Упрочняющие фазы чугунных деталей стеклоформ с градиентной структурой литья // Литье и металлургия. 2014. № 1 (74). С. 62–68.
8. Orzol D. K., Roos C., Wondraczek L. Tribological investigations of the glass-to-metal contact during glass forming at an industrial scale // International Journal of Applied Glass Science. 2021. V. 12. № 3. P. 381–390.
9. Bartocha D., Janerka K., Suchoń J. Charge materials and technology of melt and structure of gray cast iron // Journal of Materials Processing Technology. 2005. V. 162. P. 465–470.
10. Rashidi A.M., Moshrefi-Torbati M. Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure (DMS) //Materials Letters. 2000. V. 45. № 3-4. P. 203–207.
11. Karimi M. Structure of cast iron and its application in industry // Journal of Engineering in Industrial Research. 2023. V. 4. № 2. P. 77–85.
12. Александров М.В., Чистяков Д.Г. Формирование градиентной структуры в деталях стеклоформ из чугунов с различной морфологией графита // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 219–229.

**Для цитирования:** Смолякова И.А., Иванова А.И., Афанасьева Л.Е. Структурообразование чугунных отливок стеклоформ // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 1 (25). С. 24–31.

## STRUCTURE FORMATION OF CAST IRON GLASS MOLD CASTINGS

I.A. SMOLYAKOVA<sup>1</sup>, Cand. Sc., A.I. IVANOVA<sup>2</sup>, Cand. Sc.,  
L.E. AFANASIEVA<sup>1</sup>, Cand. Sc.

<sup>1</sup>Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

<sup>2</sup>Tver State University

33, Zhelyabova st., Tver, 170100, e-mail: alex.ivanova33@yandex.ru

The microstructure, chemical and phase composition of gray cast iron blanks for glass molds are investigated. The necessity of controlling the phase composition of cast iron and the formation of individual structural components in the process of layer-by-layer solidification of the casting is shown to ensure increased operational properties of the mold set parts operating under severe conditions of cyclic thermal loads and abrasive wear.

**Keywords:** glass mold, mold set, cast iron, phase composition, microstructure, microhardness, wear resistance.

Поступила в редакцию/received: 12.12.2024; после рецензирования/revised: 20.12.2024;  
принята/accepted: 23.12.2024