

10. Архаров А.П. Патрон клиновой механизированный для установки заготовки на центрах токарного станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 1 (5). С. 21–26.

**Для цитирования:** Архаров А.П. Установка вала с конической поверхностью на центрах станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 12–17.

## **SHAFT WITH A TAPERED SURFACE INSTALLATION ON THE CENTERS OF THE MACHINE**

A.P. ARKHAROV, Cand. Sc.

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitinemb., Tver, 170026, e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

An analysis of known methods and chucks for installing shafts on the centers of metal-cutting machines is presented. The relevance of the work on creating a method and means for installing a shaft with a conical surface is noted. The essence of the developed installation method is outlined, in which the transmission of torque from the machine spindle to the shaft is carried out by fixing it to its conical surface. The device and operating principle of the designed jaw chuck with a variable nature of movement of its clamping elements along the center line are disclosed. Comparative analyzes of the designed method and jaw chuck with similar known solutions were carried out. The development originality and the achieved technical result are reflected.

*Keywords:* shaft, installation, tapered surface, method, thrust centers, jaw chuck, alternating motion.

Поступила в редакцию/received: 27.11.2024; после рецензирования/revised: 02.12.2024;  
принята/accepted: 05.12.2024

УДК 621.785.54

## **МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ МНОГОКАНАЛЬНЫМ ЛАЗЕРОМ**

Н.М. ГАНЧЕВ, асп., К.А. САХАРОВ, асп., Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

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

© Ганчев Н.М., Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е., 2025

Проведены металлографические исследования конструкционной стали марки 30ХНЗА в зоне лазерной закалки. Термоупрочнение образцов выполняли с помощью непрерывного излучения многоканального СО<sub>2</sub>-лазера на различных режимах. Показано, что данный тип лазеров, в отличие от однолучевых, обладает однородностью тепловложения по ширине полосы упрочнения. В зоне лазерной закалки на

оптимальном режиме сталь имеет структуру мартенсита с микротвердостью ~7 500 МПа. Глубина упрочненного слоя составляет ~1,3 мм. Показана эффективность применения многоканального CO<sub>2</sub>-лазера для закалки конструкционной стали.

*Ключевые слова:* конструкционная сталь, лазерная закалка, многоканальный лазер, микроструктура, мартенсит, микротвердость.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-17-24**

## ВВЕДЕНИЕ

Применение лазерного излучения в обработке материалов началось в 1960-е годы, вскоре после изобретения лазеров. Экспериментально был продемонстрирован высокий потенциал лазерных технологий сварки, резки и обработки поверхности. Однако только с разработкой в 1980-х годах мощных лазеров непрерывного действия лазерная закалка стала жизнеспособной промышленной технологией [1].

Первоначально лазерная закалка использовалась в основном в аэрокосмической и автомобильной промышленности, где требовалось улучшение свойств контактных поверхностей деталей [1]. В настоящее время технологии лазерного термоупрочнения эффективно применяются в системе железнодорожного транспорта, машино- и станкостроении, в металлургии, в сфере нефтегазодобычи и геологоразведки, в производстве, ремонте дорожно-строительной техники, газотурбинных двигателей, инструментов и многих других отраслях. Широкомасштабное освоение технологии лазерного термоупрочнения позволяет экономить материальные, энергетические, трудовые и финансовые ресурсы [2–4].

Основной принцип технологии лазерной закалки основан на точном контроле тепловой энергии. Регулируя технологические параметры, такие как мощность излучения, диаметр пятна, скорость сканирования, можно получать нужную глубину и твердость обработанного слоя в соответствии с конкретными требованиями [4–6]. Точность установки параметров, контроль и автоматизация процесса лазерной закалки делают ее критически важной технологией в современном производстве [7].

Технология закалки заключается в лазерном нагреве поверхностного слоя изделия до температуры выше критической точки, при которой происходит фазовое превращение, затем следует быстрое охлаждение за счет отвода тепла в более холодную нижележащую часть материала. Высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к закалке поверхностного слоя и улучшению его характеристик, не влияя на структуру и свойства глубинных слоев.

Понимание основных принципов и механизмов взаимодействия лазерного излучения с материалом при лазерной закалке, а также рациональный выбор типов используемых лазеров имеет решающее значение для оптимизации процесса и достижения желаемых свойств материала.

Анализ литературных источников показывает, что общее состояние исследований по лазерному упрочнению стали хорошо развито и наблюдается растущее промышленное применение [6–11]. Лазерное упрочнение поверхности стало перспективным методом замены традиционной термической обработки, позволяющим обеспечить повышение ряда эксплуатационных характеристик материалов: износостойкости, коррозионной стойкости, теплостойкости и некоторых других. Улучшение эксплуатационных характеристик деталей после лазерной закалки обусловлено такими факторами, как повышение твердости поверхности и дисперсности структуры, снижение коэффициента трения [7].

Неравномерность свойств локальных участков обработанной поверхности (например, образование зон отпуска при перекрытии дорожек упрочнения) может снижать эффективность упрочнения. Большое значение имеет однородность интегрального тепловложения по ширине полосы упрочнения. Применение однолучевых лазеров с гауссовым распределением энергии в луче не обеспечивает эту равномерность без использования специальной сложной оптической системы. Многоканальный лазерный излучатель с оптимизированным распределением плотности мощности в пятне позволяет получить более высокие, по сравнению с однолучевыми лазерами, характеристики упрочняемого слоя материала [4, 5, 12].

Цель настоящей статьи – исследовать возможности использования многоканальных CO<sub>2</sub>-лазеров для лазерной закалки конструкционной стали 30ХН3А.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конструкционная сталь марки 30ХН3А (ГОСТ 4543-71) обладает повышенными прочностными свойствами в сочетании с хорошей пластичностью, вязкостью, высоким сопротивлением развитию трещин. Она применяется для изготовления крупных деталей ответственного назначения. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Таблица 1. Массовая доля элементов в стали 30ХН3А, %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe и примеси
0,27...0,33	0,17...0,37	0,30...0,60	0,6...0,9	2,75...3,15	Остальное

Лазерному упрочнению подвергались образцы стали марки 30ХН3А размером 9 × 15 × 100 мм после объемной закалки и высокотемпературного отпуска (улучшения). Лазерную закалку без оплавления поверхности выполняли с помощью непрерывного излучения многоканального (48 лучей) CO<sub>2</sub>-лазера на комплексе модели ЦЛТ-Ю-5 с мощностью выходного излучения 5 кВт. Использовали лазерный излучатель с трубками, скомпонованными в виде пакета, состоящего из вложенных один внутри другого четырех восьмигранников (патент РФ № 2580350) [12]. Данный лазер обладает оптимизированным распределением плотности мощности и времени экспозиции в точках по сечению дорожки упрочнения, наиболее полно отвечает требованиям для качественного термоупрочнения.

Режимы обработки даны в табл. 2. Каждый образец упрочнялся двумя полосами с перекрытием 30 % по линейной схеме. На рис. 1 представлено изображение поперечного сечения макрошлифа одного из полученных образцов.

Микроструктуру выявляли химическим травлением шлифов 3%-м раствором азотной кислоты и изучали с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 при усилии 1,96 Н. В качестве индентора использовали алмазную четырехгранную пирамиду с квадратным основанием.

Таблица 2. Режимы лазерной закалки

№ образца	Мощность, Вт	Диаметр пятна, мм	Скорость, мм/с	Плотность мощности, 10 <sup>8</sup> Вт/м <sup>2</sup>	Время экспозиции, с
1	2 400	6	15	0,85	0,4
2	2 400	6	10	0,85	0,6
3	2 400	8	10	0,48	0,8

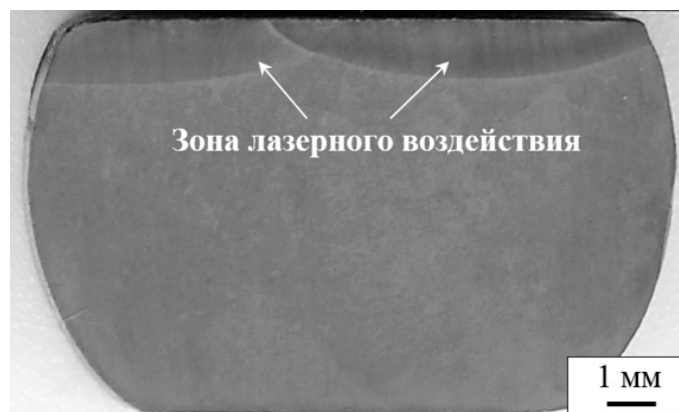


Рис. 1. Изображение макрошлифа поперечного сечения образца № 2.  
Глубина лазерной закалки 1,37 мм

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Свойства зоны лазерного воздействия зависят от многих параметров, прежде всего от температуры нагрева, времени выдержки в нагретом состоянии и скорости охлаждения. Результат лазерной закалки зависит также от исходного состояния материала после предварительной механической и термической обработки.

Конструкционная сталь 30ХН3А в исходном состоянии имеет структуру сорбита (феррито-карбидная смесь) с микротвердостью около 4 000 МПа (рис. 2а). Известно, что в феррите содержится малое количество углерода, тогда как в карбидах углерода значительно больше, т.е. структура стали химически неоднородна [13].

При лазерной закалке происходит нагрев поверхностного слоя в области температур устойчивого существования аустенита (приблизительно от 800 до 900 °С для большинства сталей). Для увеличения глубины закаленного слоя возможен нагрев стали на поверхности вплоть до температуры плавления. При этих температурах феррито-карбидная смесь превращается в аустенит, который имеет гранецентрированную кубическую решетку и способен растворять большее количество углерода по сравнению с ферритом.

Металлы обычно обладают высокой теплопроводностью и могут быстро передавать тепло от нагретого поверхностного слоя к более холодному нижележащему материалу. Это свойство выгодно для лазерной закалки, поскольку оно обеспечивает быстрое самозакаливание поверхностного слоя без заметного изменения свойств основной части детали. При охлаждении со скоростью выше критической в стали происходит мартенситное превращение. Мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в железе с объемноцентрированной тетрагональной кристаллической решеткой [13]. Мартенсит значительно тверже, чем исходные фазы, что обусловлено в первую очередь искаженной структурой его решетки, которая препятствует движению дислокаций. В результате высокоскоростной перекристаллизации увеличивается дисперсность структуры, карбиды растворяются в металлической матрице, что повышает химическую однородность. Благодаря этому в зоне упрочнения формируется мартенсит тонкой структуры и повышенной микротвердости (рис. 2б–г).

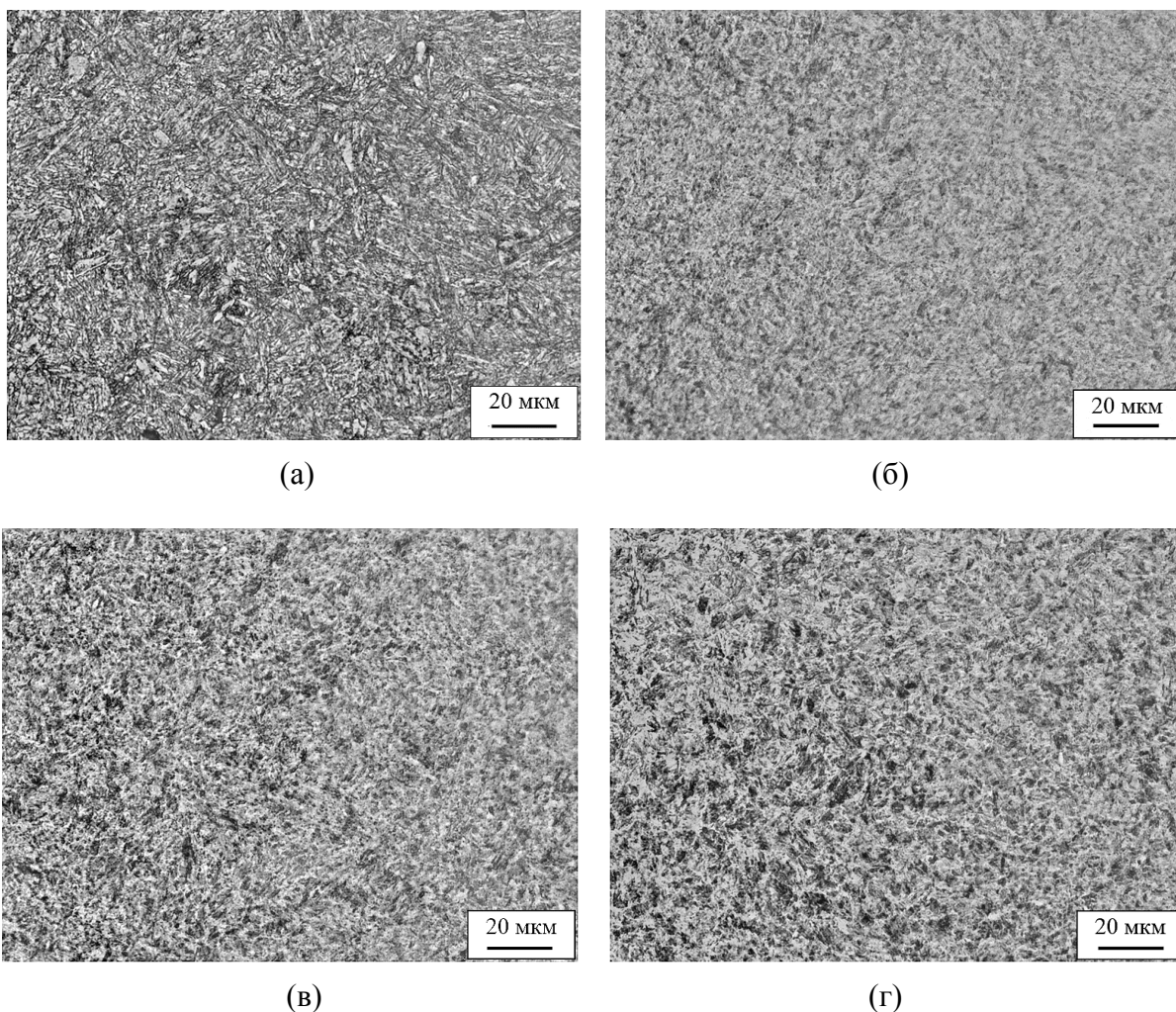


Рис. 2. Микроструктура стали 30ХН3А: вне зоны лазерного воздействия (а); в зоне лазерной закалки; образцы № 1, 2, 3 ((б), (в), (г) соответственно)

Распределение микротвердости по глубине упрочненных слоев представлено на рис. 3. Глубина закаленного слоя зависит от таких факторов, как мощность лазерного излучения, скорость сканирования и тепловые свойства металла. Время экспозиции при лазерной закалке, равное отношению диаметра пятна излучения к скорости сканирования, для первого образца меньше, чем для остальных. В результате на образце № 1 получен упрочненный слой с градиентным распределением микротвердости по глубине (рис. 3). На расстоянии до 0,5 мм от поверхности сталь имеет высокую микротвердость (7 600...7 900 МПа). Далее наблюдается плавный спад до исходных значений.

Упрочнение образца № 2 выполнялось с той же плотностью мощности, что и образца № 1. Было увеличено время экспозиции. В результате получено более однородное распределение микротвердости на большей глубине. Максимальные значения микротвердости составляли 7 100...7 400 МПа на расстоянии до 0,8 мм от поверхности образца.

Образец № 3 упрочняли на режиме с меньшей плотностью мощности. Так как диаметр пятна был увеличен до 8 мм, возросло время экспозиции. В результате получена пониженная по сравнению с предыдущими образцами микротвердость 6 000...6 300 МПа, что может быть связано с более низкими температурами нагрева стали в зоне упрочнения.

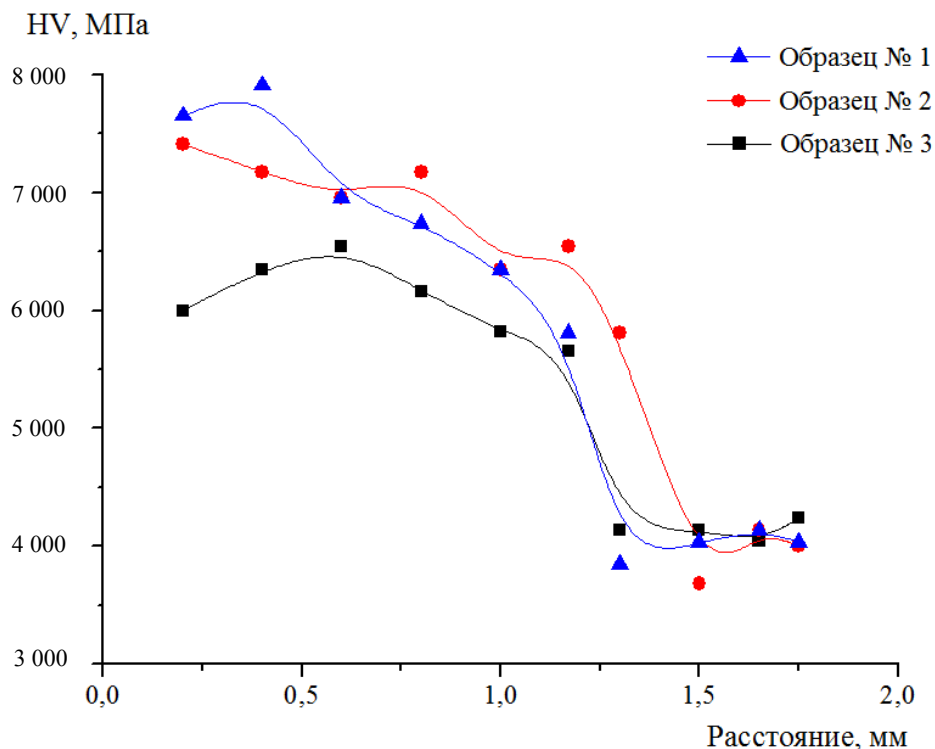


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине упрочненных слоев

Как известно, более чем в 70 % случаев выход из строя механизмов и машин происходит вследствие износа трущихся поверхностей деталей на глубину 0,3...0,5 мм [4, 14–16], т.е. свойства поверхностного слоя глубиной до 0,5 мм во многом определяют ресурс деталей. Следовательно, выполнение лазерной закалки на режимах № 1 и 2 обеспечивает необходимую глубину и твердость упрочненного слоя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненной работы показали возможности и высокую эффективность применения многоканального CO<sub>2</sub>-лазера для закалки конструкционной стали 30ХН3А. Изменяя технологические параметры обработки, можно добиться требуемой структуры и свойств рабочих поверхностей детали на необходимую глубину, что повышает маневренность при планировании срока службы. Применение многоканальных лазеров обеспечивает более высокую равномерность глубины упрочняемой зоны за счет оптимизированного распределения интенсивности излучения в пятне обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Łach Ł. Recent advances in laser surface hardening: Techniques, modeling approaches, and industrial applications // *Crystals*. 2024. V. 14. № 8. P. 726.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ, 2006. 664 с.
3. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. 664 с.
4. Югов В.И., Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Раткевич Г.В. Упрочнение конструкционной стали с помощью многоканального CO<sub>2</sub> лазера // *Письма о материалах*. 2017. Т. 7. № 1. С. 8–11.

5. Афанасьева Л.Е., Югов В.И. Повышение износостойкости сталей с помощью закалки многоканальным лазером // *Технология металлов*. 2018. № 3. С. 23–26.
6. Maharjan N., Zhou W., Wu N. Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere // *Surface and Coatings Technology*. 2020. V. 385. P. 125399.
7. Babu P.D., Marimuthu P. Status of laser transformation hardening of steel and its alloys: a review // *Emerging Materials Research*. 2019. V. 8. № 2. P. 188–205.
8. Lasota I., Protsenko V., Matyushkin A., Kuznetsov M., Gook S. Laser surface hardening of engine camshaft cams // *Materials Today: Proceedings*. 2020. V. 30. P. 478–482.
9. Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О характеристиках изнашивания стальных поверхностей, упрочненных лазерным излучением // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 38–46.
10. Muthukumar G., Dinesh Babu P. Laser transformation hardening of various steel grades using different laser types // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. V. 43. P. 1–29.
11. Li J., Yan H., Li S., Lei M. Microstructure and wear behavior of arc-shaped 40CrNiMo steel after laser hardening // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. V. 24. P. 5743–5754.
12. Патент РФ 2580350. Устройство для упрочнения поверхности детали / Югов В.И. и др. Заявл. 05.11.2014. Оpubл. 10.04.2016, Бюл. № 10.
13. Арзамасов Б.В., Макарова В.И., Мухин Г.Г., Рыжов Н.М., Силаева В.И. Материаловедение: учебник для вузов / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. 8-е изд. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.
14. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.
15. Афанасьева Л.Е., Югов В.И., Гречишкин Р.М. Металлографический мониторинг качества закалки, проводимой с помощью многоканального лазера // *Контроль. Диагностика*. 2017. № 4. С. 36–39.
16. Югов В.И. Высокоэффективная технология ресурсосбережения: лазерная поверхностная обработка // *Фотоника*. 2012. № 4. С. 12–20.

**Для цитирования:** Ганчев Н.М., Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е. Металлографический анализ конструкционной стали после закалки многоканальным лазером // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 17–24.

## **METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF STRUCTURAL STEEL AFTER HARDENING WITH MULTICHANNEL LASER**

N.M. GANCHEV, Postgraduate, K.A. SAKHAROV, Postgraduate,  
L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.,

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

Metallographic studies of structural steel grade 30KH3A in the laser hardening zone were carried out. Thermal hardening of samples was performed using continuous radiation of a multichannel CO<sub>2</sub> laser in various modes. It was shown that, unlike single-beam lasers, this

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.

Поступила в редакцию/received: 02.12.2024;  
после рецензирования/revise: 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 стеклоформирующей 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 стеклоформирующей 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 стеклоформирующей 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