

is transferred to the center line. Comparative analyzes on the distinguishing features of the created method and chucks with similar known solutions were carried out. The development originality and the achieved technical result are reflected.

Keywords: shaft, installation, keyway, method, thrust centers, jaw chuck, keyway coupling, orientation.

Поступила в редакцию/received: 02.02.2026; после рецензирования/revised: 27.02.2026;
принята/accepted: 11.03.2026

УДК 621.785.616

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-26-32

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА В БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

К.А. САХАРОВ, ассистент

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: akad.ka.3000@yandex.ru

© Сахаров К.А., 2026

Методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа исследованы микроструктура и химический состав быстрорежущей стали марки Р6М5 после лазерной закалки и лазерного отпуска. В зоне лазерной закалки из жидкой фазы практически все первичные карбиды растворяются в матрице, что позволяет получить структуру высоколегированных твердых растворов и снизить риск преждевременного выхода из строя инструментов из-за выкрашивания крупных карбидов в режущей кромке. Установлены закономерности формирования микроструктуры и распределения основных легирующих элементов.

Ключевые слова: микроструктура, быстрорежущая сталь, многоканальный лазер, растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по воздействию лазерного излучения на вещество проводятся начиная с появления первых лазерных систем [1]. В настоящее время в области лазерных технологий достигнуты значительные успехи, интенсивно развиваются и получили широкое практическое применение резка, сварка, наплавка, термообработка, ударное воздействие и др. [2]. Упрочнение рабочих поверхностей инструментов лазерным излучением – один из современных способов формирования требуемой микроструктуры, обеспечивающей улучшенный комплекс механических и эксплуатационных свойств [3–5].

Как известно, основными свойствами быстрорежущих сталей являются высокие твердость 63–67 HRC, прочность и теплостойкость (600–700 °С), а также износостойкость за счет легирования вольфрамом, молибденом, хромом, ванадием и кобальтом; использованием сложной технологии упрочнения, включающей высокотемпературную закалку с нагревом до 1 210–1 280 °С и последующим трехкратным отпуском при температуре 560 °С [6]. При изготовлении (методами литья,ковки, отжига) и упрочнении быстрорежущих сталей по традиционной технологии значительная часть легирующих элементов остается в крупных труднорастворимых

при нагреве карбидах и практически не участвует в обеспечении необходимых свойств. Негативным фактором свойством быстрорежущих сталей, изготовленных по стандартной технологии, является карбидная неоднородность, которая в свою очередь приводит к образованию дефектной зоны в области границы «карбид – матрица», вследствие чего происходит выкрашивание крупных карбидов в режущей кромке и преждевременный выход из строя инструмента [7, 8].

Преимущество лазерной обработки составляют высокие скорости нагрева и охлаждения за счет локализации излучения на поверхности обрабатываемого материала. В результате формируется структура с повышенной на 3-4 единицы HRC твердостью и износостойкостью по сравнению со стандартной обработкой [5, 6]. Основными структурными составляющими после лазерного упрочнения являются мелкоигольчатый мартенсит и остаточный аустенит. Негативное влияние на эксплуатационные свойства инструмента оказывает остаточный аустенит, присутствие которого снижает твердость и теплостойкость, если речь идет об инструменте для высокоскоростной обработки резанием [2, 8, 9]. Для штамповой оснастки объемного деформирования деталей небольшая доля остаточного аустенита в металлической матрице может благоприятно влиять на взаимодействие структурных составляющих и повышать стойкость инструмента [4].

Разработка и внедрение технологии лазерной термообработки, как с оплавлением поверхности, так и без оплавления, направлены в первую очередь на устранение вышеперечисленных недостатков в быстрорежущих сталях, изготовленных методом литья,ковки и отжига. Добиться значительного снижения количества остаточного аустенита и формирования более однородной дисперсной структуры позволяет комплексный подход. Он включает в себя лазерную закалку с оплавлением поверхности для максимального растворения крупных первичных карбидов и получения высоколегированных твердых растворов мартенсита и аустенита. Далее необходимо устранение остаточного аустенита и упрочнение стали с помощью процессов дисперсионного твердения, которые происходят при отпуске [6, 10, 11]. Лазерная закалка относится к поверхностным способам упрочнения, поэтому нагревать все изделие при отпуске нецелесообразно. В настоящей работе рассмотрена возможность применения после лазерной закалки лазерного отпуска.

Сталь, упрочненная лазерным излучением, имеет сложную слоистую структуру и разные физико-механические характеристики по глубине воздействия [5]. Особенности структурообразования, связанные с высоким легированием тугоплавкими элементами, затрудняют эффективное управление структурой и свойствами при лазерной обработке. Это направление до сих пор изучено недостаточно полно. Цель работы – исследование микроструктуры и распределения легирующих элементов в быстрорежущей стали марки P6M5 после лазерной закалки с оплавлением поверхности и лазерного отпуска.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы стали марки P6M5 (ГОСТ 19265-73) после объемной закалки и трехкратного отпуска при температуре 560 °С упрочнялись с помощью многоканального (40 лучей) CO₂-лазера на автоматизированном комплексе АЛТКУ-3. Мощность непрерывного лазерного излучения составляла 2,5 кВт, скорость сканирования 10 мм/с, диаметр пятна лазерного излучения на поверхности заготовки 6 мм. Сразу после лазерной закалки на этом же комплексе выполняли лазерный отпуск. Параметры лазерного излучения оставались прежними, за исключением мощности, которая составляла 0,8 кВт.

Экспериментальные исследования полученных образцов проводили на поперечных металлографических шлифах. Микроструктуру стали в зоне лазерного воздействия исследовали методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе JEOL JSM-6610LV. Распределение легирующих компонентов в плоскости шлифов методами рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) выполняли на энергодисперсионном спектрометре Oxford INCA Energy 350. Микротвердость измеряли на отечественном микротвердомере ПМТ-3 согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с тяжелыми условиями эксплуатации к быстрорежущим сталям предъявляются высокие требования в отношении износо- и теплостойкости, твердости, прочности [6]. Уже более ста лет, с момента появления этого материала, карбиды находятся в центре внимания исследователей, поскольку они влияют на эксплуатационные характеристики быстрорежущих сталей. Установление взаимосвязи между карбидами, как важными фазовыми компонентами, и легирующими элементами является необходимым условием для дальнейшего повышения свойств быстрорежущих сталей.

На рис. 1а представлено РЭМ-изображение микроструктуры стали Р6М5, упрочненной по стандартной технологии. Металлическая матрица в основном состоит из мартенсита, в ней распределены карбиды, имеющие глобулярную форму. Микротвердость стали около 8 200 МПа.

После лазерной закалки из жидкой фазы формируется ячеистая микроструктура (рис. 1б), дендритные ячейки имеют размер 4,5...5 мкм. При лазерном плавлении стали практически все первичные карбиды растворились в матрице. При кристаллизации расплава произошло повторное образование карбидной фазы и изменилась ее морфология. Карбиды выделились в виде тонких прослоек шириной 0,2...0,3 мкм по границам дендритных ячеек и представляют собой прерывистую сетку. Микротвердость стали около 8 500 МПа.

При лазерном отпуске (рис. 1в) происходят процессы распада остаточного аустенита и выделение дисперсных карбидов. Изменения в фазовом составе положительно влияют прежде всего на такие свойства стали, как твердость и теплостойкость. Микротвердость увеличилась до 8 800 МПа.

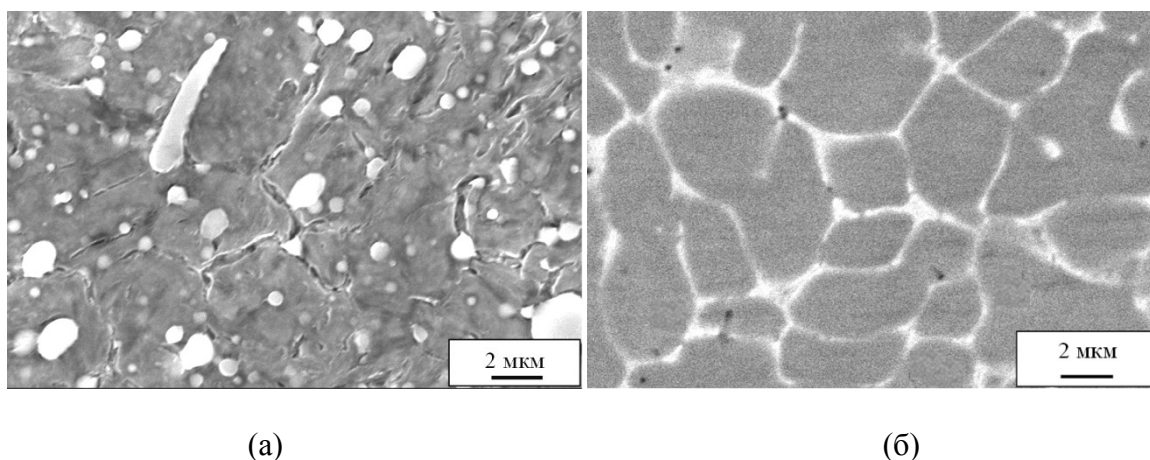
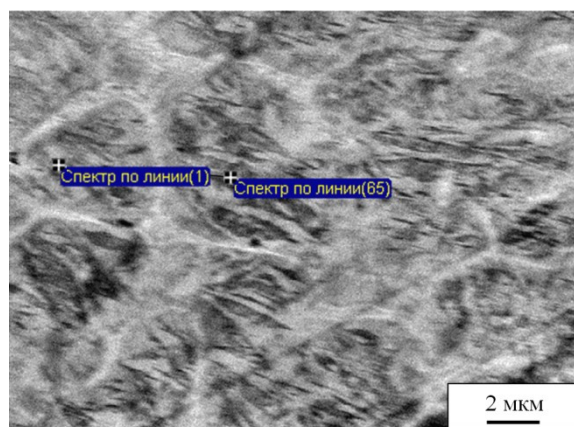


Рис. 1. Микроструктура стали Р6М5: после закалки и трехкратного отпуска (а); в зоне лазерной закалки (б); лазерного отпуска (в).

Символом ■ отмечены границы набора рентгеновских спектров вдоль линии



(в)

Рис. 1. Продолжение

В настоящей работе с помощью энергодисперсионного спектрометра, который является аналитической приставкой к РЭМ, проведен количественный и качественный анализ распределения химических элементов в выбранной области, отмеченной на рис. 1в. Исследования состава стали проводили вдоль линии в 65 точках с шагом 0,1 мкм.

При РСМА анализируется химический состав микрообъема материала, в котором происходит возбуждение рентгеновского излучения (область генерации) электронным пучком. Размеры микрообъема определяются диаметром электронного пучка и свойствами исследуемого вещества. При этом минимальный размер области генерации составляет около одного микрометра и не изменяется при дальнейшем уменьшении диаметра пучка. Таким образом, РСМА позволяет исследовать состав образца с микронным разрешением.

Рентгеноспектральный микроанализ быстрорежущей стали Р6М5 проводили после лазерного отпуска. На рис. 2 показан один из полученных спектров, на рис. 3 данные РСМА представлены графически.

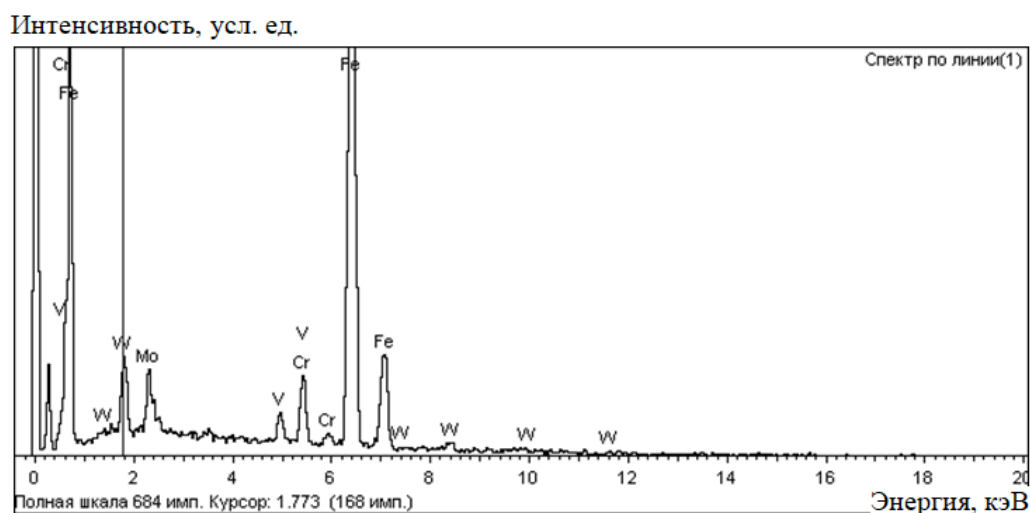


Рис. 2. Пример энергетического спектра эмитированного рентгеновского излучения, полученного в первой точке на линии

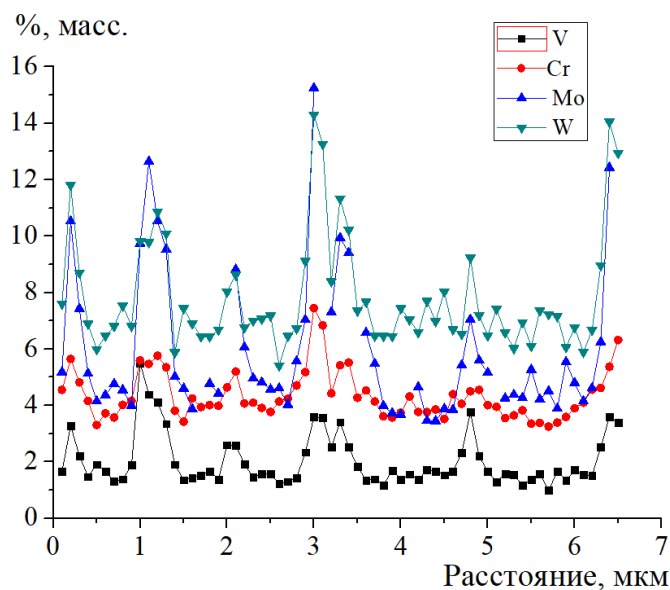


Рис. 3. Распределение массового содержания химических элементов по спектрам

Механические свойства быстрорежущих сталей в основном зависят от их химического состава и микроструктуры. Карбиды являются важнейшей фазовой составляющей. Механизмы образования, морфология и распределение карбидов в стали зависят от легирующих элементов. Анализ данных РСМА показывает значительную неоднородность распределения в составе стали карбидообразующих элементов – вольфрама, молибдена, хрома и ванадия. Этот факт, а также повышение микротвердости на 300 МПа может свидетельствовать об образовании дисперсных карбидов в процессе лазерного отпуска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лазерная закалка из жидкой фазы позволяет растворить крупные первичные карбиды и получить структуры высоколегированных твердых растворов. Последующий лазерный отпуск способствует протеканию процессов дисперсионного твердения, о чем свидетельствует неравномерное распределение легирующих элементов в стали и повышение микротвердости до 8 800 МПа. Для инструментов, упрочненных данным способом, снижается риск преждевременного выхода из строя из-за выкрашивания крупных карбидных включений в режущей кромке.

БЛАГОДАРОСТИ

Исследования микроструктуры и элементного химического состава были выполнены в лаборатории электронной микроскопии Центра коллективного пользования научной аппаратурой и оборудованием Тверского государственного университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Токарев Д.И., Дроздов А.А., Морозов Е.А., Абляз Т.Р., Иванова Ю.С., Полежаев И.С. Влияние лазерного воздействия на состояние закаленной быстрорежущей стали Р6М5 // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2019. Т. 21. № 4. С. 34–41.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной поверхностной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. 376 с.

3. Думанский И.О., Думанский А.И. Особенности лазерного упрочнения металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали / *Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития: Сб. научн. статей по материалам V Международной научно-практической конференции*. Уфа: Научно-издательский центр «Вестник науки», 2021. С. 44–48.

4. Степанкин И.Н., Верещагина Л.С., Поздняков Е.П., Девойно О.Г., Веремей П.В. Влияние лазерной модификации на эксплуатационные характеристики стали Р6М5 // *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого*. 2015. № 1 (60). С. 19–26.

5. Афанасьева Л.Е. Формирование структуры и свойств быстрорежущей стали при лазерном упрочнении // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Физика»*. 2015. № 1. С. 5–20.

6. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. Изд. 5-е, перераб. и доп. М.: Металлургия, 1983. 528 с.

7. 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.

8. Адаскин А.Д., Кремнев Л.С., Сапронов И.Ю. О разрушении ледебуритных и заэвтектоидных быстрорежущих сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 6 (672). С. 23–28.

9. Кремнев Л.С. Теория легирования и создание на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов оптимального состава // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2008. № 11. С. 18–28.

10. Chen Y., Ye C., Chen X., Zhai Q., Hu H. Effect of alloying and microalloying elements on carbides of high-speed steel: an overview // *Metals*. 2024. V. 14. № 2. P. 175.

11. Kozakov A.T., Yares'ko S.I., Sidashov A.V., Manturov D.S., Novikov V.A., Novikov E.S., Kuznetsov S.I., Marunovich O.V. Surface properties of heat-resistant W9Mo4Co6Si tool steel after laser heat treatment and their correlation with material properties in a nanoloaded tribosystem // *Materials Chemistry and Physics*. 2025. V. 344. P. 131082.

Для цитирования: Сахаров К.А. Распределение элементного состава в быстрорежущей стали после лазерного упрочнения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 26–32.

DISTRIBUTION OF ELEMENTAL COMPOSITION IN HIGH-SPEED STEEL AFTER LASER HARDENING

K.A. SAKHAROV, Assistant

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: akad.ka.3000@yandex.ru

Scanning electron microscopy and X-ray diffraction microanalysis were used to study the microstructure and chemical composition of P6M5 high-speed steel after laser hardening and laser tempering. In the laser hardening zone, almost all primary carbides dissolve in the matrix from the liquid phase, resulting in a highly alloyed solid solution structure and

reducing the risk of premature tool failure due to chipping of large carbides in the cutting edge. Patterns of microstructure formation and the distribution of the main alloying elements were established.

Keywords: microstructure, high-speed steel, multichannel laser, scanning electron microscopy, X-ray microanalysis.

Поступила в редакцию/received: 27.04.2026; после рецензирования/revise: 30.04.2026;
принята/accepted: 05.05.2026

УДК 621.03

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-32-40

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУРЫ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., 2026

Показана возможность использования уравнений энергетического баланса для оценки энергозатрат при нанесении и модификации износостойкого покрытия состава NiCrBSi на стальную поверхность с помощью порошковой лазерной наплавки. Для оценки энергетического вклада лазерного излучения в обрабатываемый материал использован ряд параметров: размерная и безразмерная энтальпии, плотность энергии, комплекс технологических параметров процесса. Рассмотрено влияние энергетических параметров на микроструктуру покрытия. Количественной характеристикой микроструктуры служит расстояние между дендритными ветвями второго порядка (дендритный параметр). Оптимизируя величину соответствующих энергетических параметров при наплавке или лазерной модификации поверхности по величине дендритного параметра, можно получить структуру покрытия, обеспечивающую требуемые механические свойства, в частности микротвердость и износостойкость.

Ключевые слова: лазерная наплавка, энергетические параметры, энергетический баланс, дендритный параметр.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных способов повышения надежности технических устройств является выбор материалов, характеристики которых соответствуют условиям эксплуатации изделия. Хорошо известно, что в подавляющем большинстве случаев причина отказа оборудования заключается в изнашивании фрикционных узлов, которые представляют собой неотъемлемую часть многих ответственных технических систем. В связи с этим актуальна задача разработки и применения износостойких материалов. К таким перспективным материалам относятся сплавы системы легирования NiCrBSi, обладающие высокой износостойкостью, коррозионной