

contact to plastic contact is proposed. On the basis of it the calculation relation for estimation of transition from stable operation of tribo-conjugation to its catastrophic wear is received.

Keywords: microarc oxidation, antifriction fillers, ceramic coating, friction, wear.

Поступила в редакцию/received: 30.11.2023; после рецензирования/revised: 12.12.2023;
принята/accepted: 15.12.2023

УДК 621.791

ВЛИЯНИЕ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНОГО РЕЗА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Д.А. БАРЧУКОВ, канд. техн. наук

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

© Барчуков Д.А., 2024

Представлены результаты исследований микроструктуры, микротвердости, микрогеометрии поверхности лазерного реза наплавленной быстрорежущей стали марки Р9М4К8 после алмазного выглаживания. Показано, что шероховатость поверхности лазерного реза уменьшается в 3...4 раза, что позволяет получать рабочую поверхность без последующего механического шлифования. Отмечено, что алмазное выглаживание приводит к измельчению микроструктуры, повышению микротвердости стали до $9\ 700 \pm 130$ МПа.

Ключевые слова: лазерная резка, сталь, алмазное выглаживание, шероховатость, микроструктура, микротвердость.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-36-42

ВВЕДЕНИЕ

По масштабам применения лазерная резка занимает лидирующие позиции в мире, если сравнивать с другими видами лазерных технологий, благодаря своим преимуществам: возможности разделения широкого класса материалов независимо от их твердости и теплофизических характеристик; отсутствию механического воздействия на материал во время разделения; высокой производительности с возможностью автоматизации и контроля процесса, а также некоторым другим [1–6].

Основными показателями качества поверхности реза металлов являются точность, шероховатость, протяженность зоны термического влияния, ширина реза, количество грата [1]. Поверхность лазерного реза имеет специфическую бороздчатую структуру, и ее шероховатость зависит от тепловых характеристик лазерного излучения, параметров струи газа, погрешности устройства перемещения [1–4]. Снижение шероховатости поверхности реза является важной задачей, так как значения параметров шероховатости оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства функциональных поверхностей деталей и инструментов, например на интенсивность износа, несущую способность, контактные деформации и контактную жесткость, скорость коррозии поверхностного слоя и некоторые другие [5, 6]. Наименьшие параметры шероховатости поверхности достигаются при резке на

стационарных режимах [2]. Для разделения высоколегированных сталей больших толщин реализация стационарного режима лазерной резки является сложной задачей.

Эффективный способ модификации – поверхностное пластическое деформирование [7–10]. Пластическая деформация может изменять как механические, так и физические свойства металла, при этом возможно снижение параметров шероховатости в 5...10 раз, создание благоприятной для повышения износостойкости формы микронеровностей [7].

Метод алмазного выглаживания характеризуется достаточно высокой производительностью, универсальностью и возможностью обработки различных поверхностей, простотой технологической наладки и оснастки. В результате применения этого метода улучшаются эксплуатационные характеристики поверхности за счет отсутствия растягивающих напряжений в поверхностном слое металла и его упрочнения, отсутствия неровностей заостренной формы, увеличения контактной поверхности [8, 9]. Цель работы заключается в исследовании влияния алмазного выглаживания на структуру и свойства поверхности лазерного реза высоколегированной стали.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

На заготовки из среднеуглеродистой низколегированной стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-71) дугой прямого действия на постоянном токе обратной полярности в защитной среде аргона осуществляли наплавку порошковой проволокой, по химическому составу близкой к быстрорежущей стали Р9М4К8 (табл. 1). Наплавку выполняли на следующих режимах: сила тока – 180...190 А, напряжение – 21...22 В, скорость – 12 м/час. После наплавки заготовки подвергали низкотемпературному отпуску при 200 °С с выдержкой 1 час для снижения уровня остаточных напряжений, предотвращения образования холодных трещин [11, 12]. Затем полученные заготовки разрезали вдоль наплавленного валика с помощью лазерной резки на комплексе ВыSprint 3015 компании Bystronic. Параметры резки были следующие: мощность излучения – 3 200 Вт; скорость – 1,0 м/мин; давление вспомогательного газа азота – 1,5 МПа. Толщина разрезаемых образцов составляла около 4,4 мм.

Таблица 1. Химический состав стали Р9М4К8 (ГОСТ 19265-73)

C	Mn	Si	Cr	W	V	Co	Mo	Fe
1...1,1	0,2...0,5	0,2...0,5	3...3,6	8,5...9,5	2,3...2,7	7,5...8,5	3,8...4,3	Остальное

Выглаживание поверхности реза выполняли по упругой схеме [13] с использованием выглаживателя из синтетического поликристаллического алмаза с радиусом вершины $R = 1,5$ мм. Обработку производили на одностоечном вертикальном координатно-расточном станке 2E450AФ30 с числовым программным управлением, классом точности А и дискретностью отсчета координат 1 мкм по осям X, Y, Z. Выглаживатель устанавливали в головку плунжерного типа, позволяющую изменять усилие обработки P от 100 до 300 Н. Усилие контролировали по лимбу головки. Пластическое деформирование поверхности проводили с применением масла И-20А. Параметры были следующие: сила выглаживания – 200 Н; подача – 0,02 мм/об; скорость – 200 м/мин.

Количественную оценку микрогеометрии поверхности реза выполняли по профилограммам, записанным перпендикулярно ходу лазерного луча с помощью цифрового измерителя шероховатости TIME Group Inc. (модель TR-200). По

профилограммам определяли высотные и шаговые параметры микрогеометрии для профиля шероховатости согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014: среднее арифметическое отклонение профиля Ra ; максимальную высоту пика профиля Rp ; общую высоту профиля Rt .

Исследования микроструктуры образцов проводили с использованием металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 при усилении 1,96 Н.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сущность процесса алмазного выглаживания заключается в упругопластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – алмазным индентором. При этом неровности поверхности, оставшиеся от предшествующей обработки, сглаживаются, повышается твердость поверхностного слоя. Изображение поверхности образца после лазерной резки и алмазного выглаживания представлено на рис. 1. Параметры микрогеометрии исследованных поверхностей приведены в табл. 2, распределение микротвердости – на рис. 2. Анализ табл. 2 показал, что шероховатость поверхности лазерного реза уменьшается в 3...4 раза после алмазного выглаживания. Этот факт позволяет получать рабочую поверхность инструмента без последующего механического шлифования.



Рис. 1. Изображение поверхности образца:
1 – после лазерной резки; 2 – после алмазного выглаживания

Таблица 2. Характеристики микрогеометрии поверхности

Обработка	Параметры шероховатости, мкм		
	Ra	Rt	Rp
Лазерная резка	1,4	12	5,3
Алмазное выглаживание	0,32	1,6	0,60

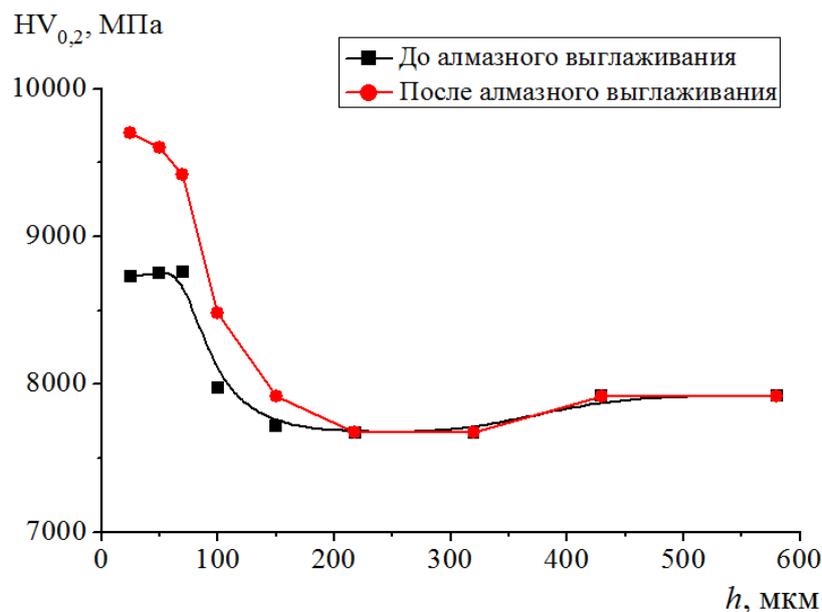
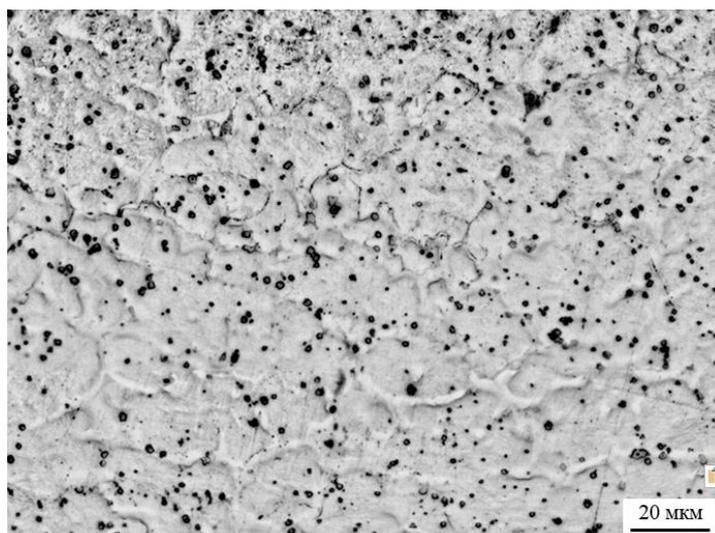


Рис. 2. Распределение микротвердости

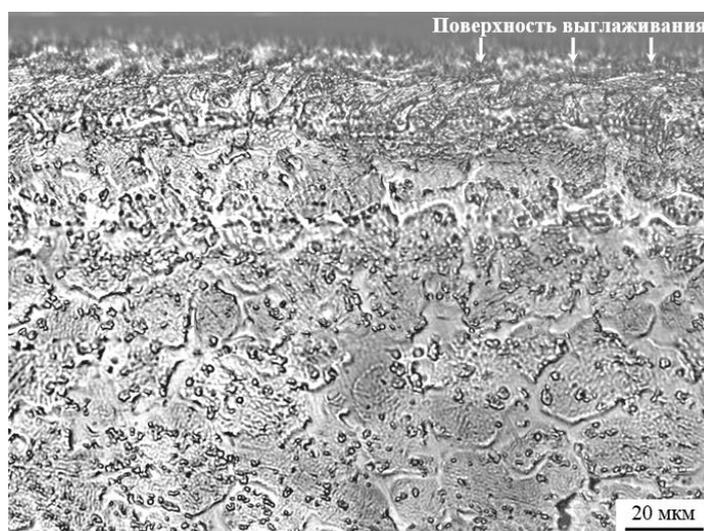
При тепловом воздействии лазерного излучения в стали происходят структурные превращения, приводящие к изменению свойств, в частности дополнительному упрочнению поверхностей реза [1]. Этот факт, наряду с макро- и микрогеометрическими свойствами поверхности реза, является одним из основных критериев, определяющих место лазерной обработки в технологическом процессе изготовления изделий и качество обработки.

При лазерной резке быстрорежущих сталей формируется зона термического влияния, имеющая слоистое строение [1, 7]. В поверхностном слое реза на глубину до 120...150 мкм произошла повторная закалка (см. рис. 2). Нижняя граница зоны закалки определяется нагревом до температуры точки A_{c1} , при которой образуется аустенит. Для стали марки Р9М4К8 эта температура равна 800 °С. Фазовый состав стали в этом слое – остаточный аустенит, мартенсит и нерастворенные карбиды. Микроструктура наплавленной быстрорежущей стали в зоне закалки представлена на рис. 3а. Сталь в данной зоне имеет повышенную микротвердость $HV_{0,2} = 8\,760 \pm 150$ МПа и обладает высокой устойчивостью к действию химических травителей, что косвенно свидетельствует о насыщении твердого раствора углеродом и легирующими элементами за счет растворения избыточных фаз.

Зона отпуска образуется при нагреве стали ниже точки A_{c1} , т.е. ниже температуры 800 °С. Протяженность зоны отпуска – около 200 мкм, микротвердость $HV_{0,2} = 7\,700 \pm 120$ МПа. В этом слое имеет место незначительное понижение микротвердости (по сравнению с наплавленным металлом), связанное с началом распада мартенсита. Степень разупрочнения стали в зоне отпуска и ее протяженность зависят от режимов лазерной резки. Чем меньше по длительности термическое воздействие, тем выше твердость стали в зоне отпуска. Микроструктура быстрорежущей стали после наплавки и низкотемпературного отпуска представляет собой игольчатый мартенсит, остаточный аустенит и карбиды. Наплавленный слой вне зоны термического влияния имеет микротвердость $HV_{0,2} = 8\,000 \pm 200$ МПа.



(а)



(б)

Рис. 3. Микроструктура наплавленной быстрорежущей стали
вблизи поверхности лазерного реза: до (а) и после (б) алмазного выглаживания

Так как быстрорежущая сталь в зоне закалки содержит, помимо мартенсита и карбидов, значительное количество остаточного аустенита, то во время алмазного выглаживания возможно превращение $Fe\gamma$ в $Fe\alpha$, т.е. остаточный аустенит будет превращаться в мартенсит деформационный. Кроме фазового превращения, в пластически деформированном слое происходит измельчение микроструктуры (см. рис. 3б). Все эти процессы приводят к заметному повышению микротвердости. Особенно значительное ее повышение происходит в поверхностном слое на глубину до 50 мкм (до значений 9 600...9 700 МПа (см. рис. 2)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При лазерной резке быстрорежущей стали Р9М4К8 формируется зона термического влияния. В частности, на глубину до 150 мкм происходит повторная

закалка стали. В этой зоне наплавленная быстрорежущая сталь имеет микротвердость $HV_{0,2} = 8\,760 \pm 150$ МПа. Алмазное выглаживание поверхности лазерного реза позволяет в 3...4 раза снизить характеристики шероховатости, что дает возможность отказаться от механической обработки рабочих поверхностей инструмента. Кроме этого, в поверхностном слое происходит измельчение микроструктуры, повышение микротвердости до $HV_{0,2} = 9\,700 \pm 130$ МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрин А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ. 2006. 664 с.
2. Sobih M., Crouse P.L., Li L. Striation-free Fibre Laser Cutting of Mild Steel Sheets // *Applied Physics A*. 2008. V. 90. № 1. P. 171–174.
3. Tani G., Tomesani L., Campana G., Fortunato A. Quality Factors Assessed by Analytical Modelling in Laser Cutting // *Thin Solid Films*. 2004. V. 453. P. 486–491.
4. Wee L.M., Li L. An Analytical Model for Striation Formation in Laser Cutting // *Applied Surface Science*. 2005. V. 247. Is.1-4. P. 277–284.
5. Genna S., Menna E., Rubino G., Tagliaferri V. Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality // *Applied Sciences*. 2020. № 10 (14). P. 4956.
6. Kanyilmaz A. The Problematic Nature of Steel Hollow Section Joint Fabrication, and a Remedy Using Laser Cutting Technology: A Review of Research, Applications, Opportunities // *Engineering Structures*. 2019. № 183. P. 1027–1048.
7. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Измайлов В.В., Барчуков Д.А. Исследование триботехнических свойств поверхностей, полученных воздействием концентрированных потоков энергии. Тверь: ТвГТУ. 2022. 164 с.
8. Zhang Y., Fu H., Wang X., Liang H., Puzoza J.C., Ji J., Hua X., Xu X., Fu Y. Additional Tribological Effect of Laser Surface Texturing and Diamond-like Carbon Coating for Medium Carbon Steel at Near Room Temperature // *Coatings*. 2020. V. 10. № 10. P. 929.
9. Zablotskiy V., Moroz S., Tkachuk A., Prystupa S., Zabolotnyi O. Influence of Diamond Smoothing Treatment Power Parameters on Microgeometry of Working Surfaces of Conjugated Parts // *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes*. Cham: Springer International Publishing. 2019. P. 372–381.
10. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Интеллект. 2009. 472 с.
11. Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е. Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 16–22.
12. Барчуков Д.А., Вавилов Р.В., Якимюк Р.И. Исследование факторов, влияющих на образование трещин в наплавленных быстрорежущих сталях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 21–27.
13. Абрамов Ю.А. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение. 1985. Т. 2. 496 с.

Для цитирования: Барчуков Д.А. Влияние алмазного выглаживания на структуру и свойства поверхности лазерного реза высоколегированной стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 36–42.

INFLUENCE OF DIAMOND BURNISHING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SURFACE OF LASER CUTTING HIGH-ALLOY STEEL

D.A. BARCHUKOV, Cand. Sc.

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

The results of studies of the microstructure, microhardness, microgeometry of the laser cut surface of deposited high-speed steel grade R9M4K8 after diamond burnishing are presented. It has been shown that the surface roughness of a laser cut is reduced by 3...4 times, which makes it possible to obtain a working surface without subsequent mechanical grinding. It is noted that diamond smoothing leads to microstructure refinement, increase of steel microhardness up to $9\ 700 \pm 130$ MPa.

Keywords: laser cutting, steel, diamond burnishing, roughness, microstructure, microhardness.

Поступила в редакцию/received: 05.12.2023; после рецензирования/revised: 11.12.2023;
принята/accepted: 15.12.2023

УДК 621.914.3

УСТАНОВКА ВАЛА В МЕХАНИЗИРОВАННОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ С ДВУМЯ ЗАЖИМНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

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

© Архаров А.П., 2024

Представлен анализ известных способов и приспособлений для установки валов на металлорежущие станки при обработке шпоночных пазов. Изложена сущность разработанного способа установки ступенчатого вала. Раскрыты устройство и принцип действия спроектированного приспособления с двумя зажимными механизмами. Проведены сравнительные анализы предложенных способа и устройства с аналогичными известными решениями. Отражены оригинальность разработок и достигаемый технический результат.

Ключевые слова: вал, установка, шпоночный паз, расположение, способ, точность, приспособление, зажимной механизм.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-42-48

ВВЕДЕНИЕ

Многие изделия машиностроительного производства имеют валы с разнообразными конструктивными элементами. Среди них встречаются валы со шпоночными пазами на одном из концов и другими конструктивными элементами в

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 1 (21), 2024*