

Научная статья

УДК 621.791.05:620.179

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-50-58

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ НАПЛАВКИ

Абабков Николай Викторович^{1,2}, Пимонов Максим Владимирович^{1,2},
Никитенко Михаил Сергеевич^{1,2}, Левашова Елена Евгеньевна¹

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

² Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук

* для корреспонденции: n.ababkov@rambler.ru



Информация о статье

Поступила:

10 марта 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

10 июня 2025 г.

Принята к публикации:

20 июня 2025 г.

Опубликована:

26 июня 2025 г.

Ключевые слова:

восстановление наплавкой,
режимы резания,
конструкционная сталь;
предел текучести, твердость,
средний размер зерна,
спектрально-акустический
метод.

Аннотация.

В настоящее время значительная доля оборудования минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплекса отработала свой ресурс, вследствие чего сохраняется актуальность разработки и изучения способов продления срока службы деталей и металлоконструкций за счет применения упрочняющих технологий и оптимальных режимов механической обработки для получения нужной геометрии. В работе представлены результаты исследований образцов после наплавки и механической обработки поверхностного слоя резанием с применением различных режимов. Анализировались основные параметры поверхностного слоя, в частности твердость, измеренная по методу Виккерса, микроструктура наплавленного металла, а также с применением неразрушающих методов, в частности спектрально-акустического, получены акустические характеристики. Показано, что режимы обработки влияют на микроструктуру поверхностного слоя. К уменьшению механических характеристик, таких как твердость и предел текучести, приводит увеличение размера зерна в наплавленном металле и увеличение толщины срезаемого поверхностного слоя. Получены и представлены результаты неразрушающего контроля в виде графиков зависимости времени задержки поверхностных акустических волн Релея и средних значений твердости от толщины срезаемого слоя наплавленного металла, а также график зависимости значений предела текучести от времени задержки акустического сигнала. Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть применены для оценки качества поверхностного слоя деталей машин после операций реновации, включая восстановление и механическую обработку. При этом оценка микроструктуры, наличие или отсутствие поверхностных дефектов будет осуществляться без вырезки образцов спектрально-акустическим методом неразрушающего контроля.

Для цитирования: Абабков Н.В., Пимонов М.В., Никитенко М.С., Левашова Е.Е. Влияние режима механической обработки на микроструктуру и механические характеристики поверхностного слоя образцов из конструкционной стали после наплавки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 50-58. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-50-58, EDN: WJLYW

Введение

Одной из наиболее актуальных в современном машиностроении остается задача продления срока эксплуатации деталей и узлов технологического оборудования. Износ, разрушение и выходы из строя деталей и узлов такого оборудования приводят к существенным материальным потерям для предприятия вследствие простоев. Данную проблему усугубляет наличие значительной доли импортного оборудования на предприятиях минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплекса, что приводит к ситуации, значительно усложняющей продление ресурса поставляемых деталей и узлов. Целесообразным для продления срока эксплуатации имеющегося технологического оборудования в данной ситуации, особенно с учетом ужесточения санкционной политики, видится усовершенствование технологий реновационного ремонта изношенных деталей и узлов [1–4].

Как известно, технологии реновационного ремонта деталей после износа поверхностного слоя основаны на его восстановлении разными способами, чаще всего дуговой наплавкой. После наплавки производится механическая обработка детали до номинальных размеров и качества поверхности, соответствующих конструкторской документации [5]. Таким образом, способы восстановления поверхностного слоя должны отвечать требованиям универсальности и обеспечения требуемого ресурса, а также ожидаемым техническим характеристикам готовой детали или поверхности. Методы обработки должны быть высокопроизводительны и технологичны, а также иметь возможность воспроизведения с использованием оборудования минимальной сложности и соответствовать экологическим нормам и требованиям современного производства [3, 4].

Разработка новых и совершенствование существующих технологий реновационного ремонта изношенных деталей позволяет уменьшить затраты предприятий на закупку оборудования из-за экономии отсутствия полного цикла изготовления детали, а также сокращения времени простоя оборудования за счет исключения времени поставки новых деталей. Кроме того, применение технологий реновационного ремонта позволяет увеличить

срок эксплуатации изношенных деталей за счет возможности получения поверхностного слоя металла с широким диапазоном требуемых характеристик [2–4].

Последующая механическая обработка резанием приводит к пластическому деформированию и структурным изменениям в поверхностном слое металла [5], в том числе наблюдается рост числа таких дефектов, как дислокации, вакансии и др. Таким образом происходит и изменение физико-механических свойств поверхностного слоя металла в результате упругопластического деформирования во время механической обработки. Как следствие, материал поверхностного слоя упрочняется – возрастают пределы прочности, текучести, упругости и усталости, твердость, при этом характеристики пластичности (относительное удлинение и сужение) чаще всего снижаются, и повышается хрупкость металла [6, 7]. Таким образом, проведение исследований, направленных на оценку влияния параметров механической обработки восстановленного поверхностного слоя на структуру и свойства материала, является актуальной научной задачей. В связи с этим цель настоящего исследования заключается в установлении рационального режима механической обработки деталей после наплавки и обосновании возможности контроля качества поверхностного слоя спектрально-акустическим методом.

Материалы и методы исследований

В качестве материала для наплавки выбрана конструкционная низколегированная сталь 09Г2С, толщина заготовки равнялась 10 мм. Наплавка на образцы выполнялась плавящимся электродом (сварочная проволока Св-08Г2С, Ø 1,6 мм) в защитном газе с соблюдением следующих режимов – сварочный ток 310 ± 10 А, напряжение 22 ± 1 В, скорость 21 ± 3 м/ч. Для обработки поверхности наплавленного слоя образцов применялось фрезерование на станке ФУ-321. Подробно режимы выполненной механической обработки представлены в Таблице 1.

Для оценки результатов применялся метод оптической металлографии. Произведены замеры кристаллов, изучена их форма, проанализировано распределение и относительные объемные количества кристаллов

Таблица 1. Значения режимов обработки наплавленного слоя исследуемых образцов фрезерованием
Table 1. Milling processing modes of the deposited layer for the studied samples

№ обр.	Подача, s , мм/об	Глубина резания t , мм	Кол-во оборотов, n , об/ мин	Скорость резания V , м/мин
1	0,32	0,5	640	70
2	0,4	1	780	100
3	0,32	1,5	780	110
4	0,32	2	520	140

различных форм, форма инородных включений и микропор в наплавленном слое металла образцов. Для описанных задач оптической металлографии применялся металлографический микроскоп МетаМ РВ-21-2 [9]. На твердомере Duravision-30 проведены измерения твердости поверхностного слоя металла методом Виккерса.

Кроме того, авторами ранее разработан комплекс средств технической диагностики, восстановления и упрочнения элементов горнодобывающего оборудования и оборудования ТЭК [10], в состав которого в том числе, входит измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН», работа которого основана на спектрально-акустическом методе [11]. Все наплаваемые образцы также подвергнуты испытаниям неразрушающими методами, в результате чего получены зависимости времени задержки поверхностных акустических волн Релея и средних значений твердости от толщины срезаемого слоя наплавленного металла, а также зависимость значения предела текучести от времени задержки поверхностных акустических волн Релея.

Результаты и их обсуждение

С целью анализа результатов исследования свойств восстановленного наплавленного слоя проведено сравнение акустических характеристик образцов в сопоставлении с первым, принятым за базовый, поскольку он являлся пригодным для применения, при этом

подвергался наименьшей механической обработке. Для второго образца, подвергнутого фрезерованию поверхности путем снятия фрезером слоя толщиной 1 мм, установлено увеличение времени задержки поверхностной акустической волны Релея и коэффициента затухания, а также уменьшение амплитуды принятого сигнала поверхностной акустической волны Релея. Стабильные значения измеренных акустических характеристик подтвердило отсутствие внутренних дефектов материала [5, 10, 14–19]. Тем не менее, разница между результатами измерений для первого и второго образцов указывает на наличие значимых различий структуры металла.

При исследовании третьего образца зафиксировано повышение времени задержки поверхностной акустической волны Релея относительно первого образца на 25 наносекунд, связанное с накопленными деформациями в металле поверхностного слоя после механической обработки. Эти данные согласуются с выводами, представленными в исследованиях [18, 19], подтверждая значительное воздействие интенсивности деформаций, вызванных применяемыми режимами резания, на изменение времени задержки акустического сигнала.

На основании полученных экспериментальных данных были построены графические зависимости изменения времени

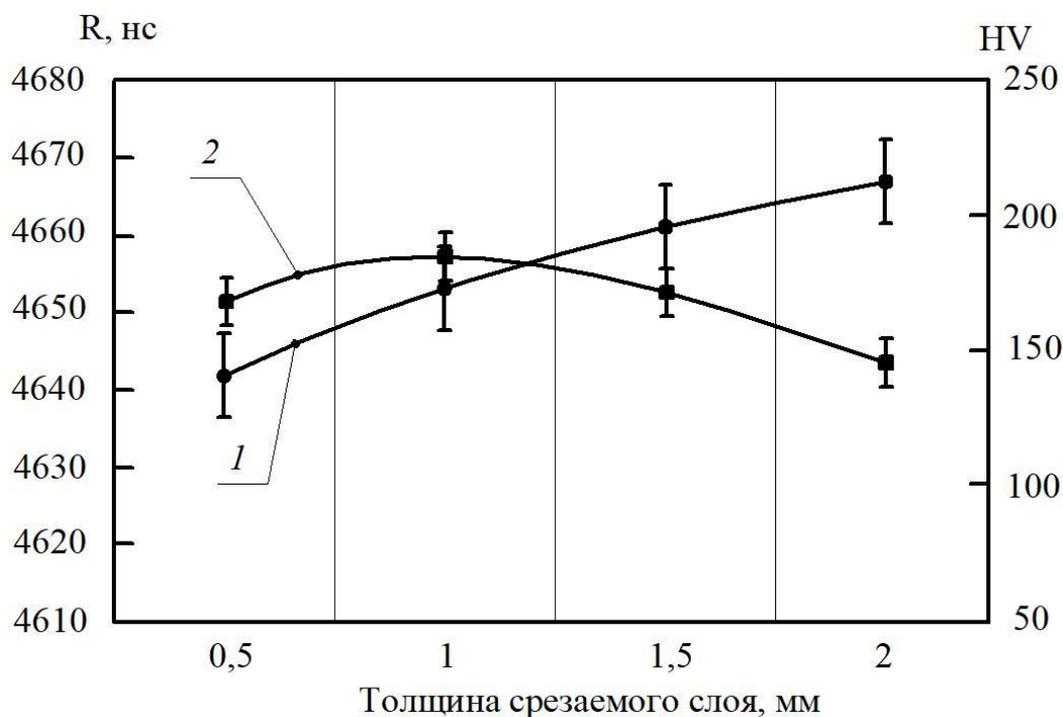


Рис. 1. Зависимости времени задержки поверхностных акустических волн Релея (1) и средних значений твердости (2) от толщины срезаемого слоя

Fig. 1. Dependences of the delay time of Rayleigh surface acoustic waves (1) and average hardness values (2) on the thickness of the cut layer

задержки волн Релея на поверхности и средних значений твердости от величины срезаемого слоя (см. Рис. 1). Анализ результатов позволил сделать заключение о применимости спектрально-акустического метода для оценки качества наплавленного покрытия после завершения процесса механической обработки.

Анализ значений твердости (Рис. 1) показал, что характер его связи с глубиной срезаемого слоя является неоднозначным. Так, например, второй образец, прошедший механическую обработку фрезеровкой на глубину 1 мм, демонстрирует наибольшую твердость среди всех испытанных образцов. Это явление может быть обусловлено благоприятным выбором технологических условий обработки. Напротив, сравнительно низкая твердость базового образца обусловлена недостаточностью пластической деформации во время фрезерования и малым накоплением остаточных напряжений в наплавленном поверхностном слое.

Существенное уменьшение значения твердости у четвертого образца говорит о повышенном температурно-силовом воздействии на поверхность металла и о более высокой интенсивности пластической деформации.

Исходя из анализа совместного графика (Рис. 1), можно заключить, что рациональным является значение толщины срезаемого слоя, равное 1 мм.

Оценка механических характеристик материала и выбор рационального режима обработки могут быть осуществлены по результатам изучения микроструктуры металла наплавленного слоя. Структура основного металла – низколегированная сталь 09Г2С – соответствует мелкозернистой феррито-перлитной структуре (балл зернистости 9–10), имеющей полосчатый характер и пластинчатую форму перлита (Рис. 2, а). Граница сплавления основного металла (сталь 09Г2С) с наплавленным металлом (сварочная проволока

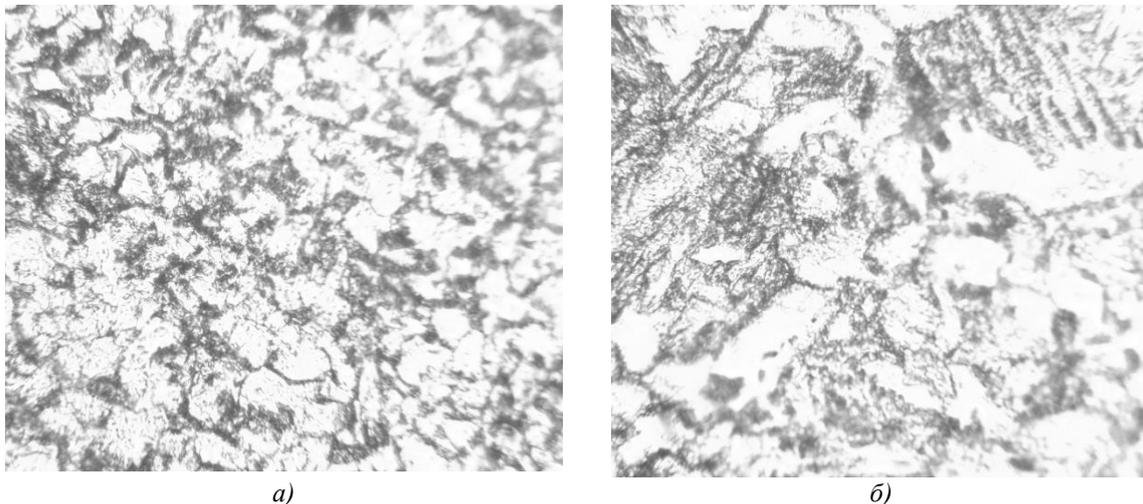


Рис. 2. Изображения микроструктуры металла исследуемых образцов из низколегированной стали 09Г2С, $\times 1000$: а – основной металл; б – зона сплавления наплавленного и основного металла
Fig. 2. Images of the metal microstructure of the studied samples made of low-alloy steel 09G2S, $\times 1000$: a – base metal; b – fusion zone of deposited and base metal

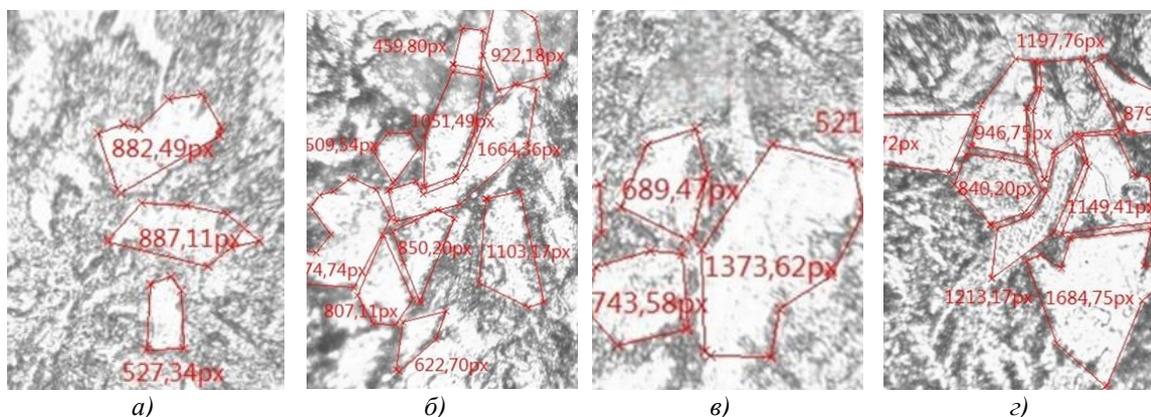


Рис. 3. Примеры изображений по расчету размера зерна: а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3; г – образец №4
Fig. 3. Examples of images for calculating grain size: a – sample No. 1; b – sample No. 2; c – sample No. 3; d – sample No. 4

Св-08Г2С) представлена структурой с крупным зерном, окруженным ферритной оторочкой и содержащим мелкие иглообразные частицы внутри зерна (Рис. 2, б).

После механической обработки фрезерованием был проведен расчет размера зерен по полученным изображениям микроструктуры. Иллюстрация результатов измерения и расчета размеров зерен для каждого из исследованных образцов представлена на Рис. 3, а-г.

Для оценки влияния размера зерна на предел текучести (σ_T) и твердость (HV) был произведен расчет по формуле Холла-Петча [15]

$$\sigma_T(HV) = \sigma_0(H_0) + \frac{k}{\sqrt{D}},$$

где σ_T – предел текучести, HV – твердость материала по Виккерсу, σ_0 – внутренние напряжения, которые ограничивают пластический сдвиг в теле зерна, k – коэффициент пропорциональности, D – размер зерна.

Результаты расчета размеров зерен и значений предела текучести представлены в Таблице 2. На основе собранных данных получена зависимость, отражающая взаимосвязь между значениями предела текучести и временем задержки поверхностной акустической волны (Рис. 4).

Анализ проведенных исследований показал, что повышение толщины срезаемого слоя до 2 мм и скорости обработки до 140 м/мин приводит к увеличению размера зерен, что отрицательно влияет на такие прочностные характеристики материала, как предел текучести и твердость. Дополнительно установлена корреляционная зависимость между временем задержки поверхностных акустических волн Релея и значениями предела текучести металла наплавленных слоев после механической обработки (Рис. 4).

Выводы

1. С использованием методов неразрушающего контроля проведены исследования наплавленного металла образцов деталей после реновации поверхностного слоя. Было определено, что существует прямая зависимость между толщиной срезаемого при механической обработке слоя и временем задержки поверхностных акустических волн Релея. Показано, что рациональным является режим механической обработки, которому соответствует значение толщины срезанного слоя, равное 1 мм. Анализ микроструктуры металла наплавленного слоя показал, что повышение толщины срезаемого слоя до 2 мм и скорости обработки до 140 м/мин приводит к

Таблица 2. Результаты расчета размеров зерен и значений предела текучести

Table 2. Results of grain size measurements and yield strength calculations

№ образца	Средний размер зерна, D, мкм	Предел текучести наплавленного металла, σ_T , МПа
1	5,94±0,42	442±4
2	6,72±0,46	430±4
3	7,25±0,49	419±3
4	7,67±0,51	416±3

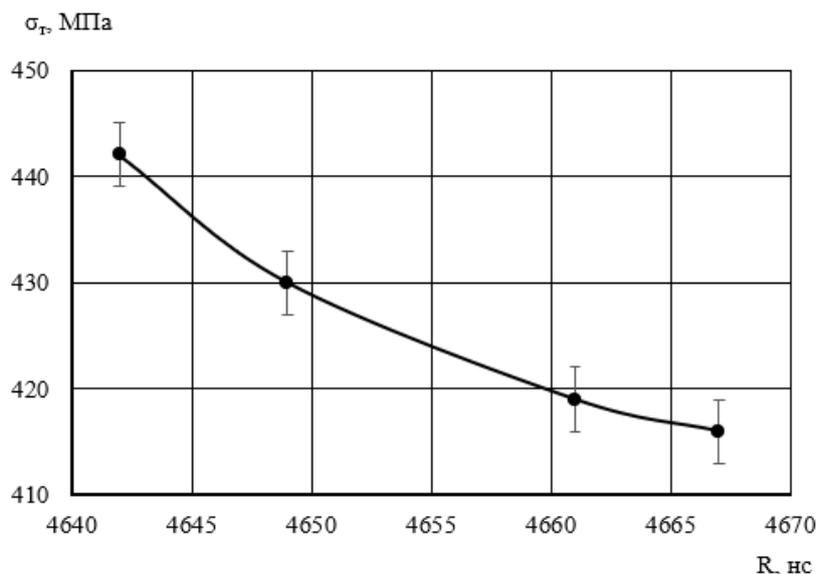


Рис. 4. Зависимость предела текучести наплавленного металла от времени задержки поверхностной акустической волны Релея

Fig. 4. Dependence of the yield strength of the deposited metal on the delay time of the Rayleigh surface acoustic waves

увеличению размера зерен, что отрицательно влияет на такие прочностные характеристики материала, как предел текучести и твердость. Установлено наличие связи между пределом текучести металла наплавленного слоя после механической обработки и временем задержки поверхностных акустических волн Релея.

2. Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть применены для оценки качества поверхностного слоя деталей машин после операций реновационного ремонта изношенных деталей, включающего восстановление и механическую обработку. При этом оценка микроструктуры, наличие или отсутствие поверхностных дефектов будет осуществляться спектрально-акустическим методом неразрушающего контроля без вырезки образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абабков Н. В., Пимонов М. В., Левашова Е. Е. Исследование микроструктуры и механических характеристик поверхностного слоя образцов после наплавки и механической обработки // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2022) : сборник трудов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 19–21 апреля 2022 года. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. С. 218–224. EDN VXJCIY.
2. Коротков В. А., Бердников А. А., Толстов И. А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями. Челябинск : Металл, 1993. 144 с.
3. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1990. 528 с.
4. Volkov O., Knyazev S., Subbotina V. [и др.] Construction of surface layers with special properties in the hardening of steels // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering, 2022. Vol. 1235. P. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/1235/1/012031.
5. Гридин К. С., Чуйков Д. А., Мальцева О. Н. Анализ технологий восстановления детали «кулак разжимной» автомобиля КАМАЗ // Технологии, машины и оборудование для проектирования, строительства объектов АПК : Сборник научных статей Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Курск : Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, 2023. С. 126–129.
6. Гадалов В. Н., Коваленко И. А., Кутепов С. Н., Скрипкина Ю. В., Калинин А. А. Мониторинг влияния вибровоздействия на поверхностные слои конструкционных металлов и сталей с оценкой их механических и эксплуатационных свойств // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 1. С. 172–176. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-3-172-177.
7. Смирнов А. Н., Козлов Э. В. Градиентные структуры при обработке металлов резанием. Кемерово : ООО «Сибирская издательская группа», 2013. 179 с.
8. Караина Ю. И., Конков В. Ю., Опарина Т. А. Оценка качества и механических свойств получаемых слоев металла из низкоуглеродистой стали методом WAAM с использованием дополнительной механической и ультразвуковой обработки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2024. Т. 26. № 4. С. 75–91. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-75-91.
9. Баранникова С. А., Никонова А. М. Влияние электролитического наводороживания на механические и акустические свойства нержавеющей стали // Вестник ПНИПУ. Механика. 2024. № 6. С. 5–14. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.6.01.
10. Смирнов А. Н., Козлов Э. В., Купченко М. В. [и др.] Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 1. Микроскопия и рентгеноструктурный анализ // Вестник КузГТУ. 2010. № 4. С. 62–68.
11. Никитенко М. С., Князьков К. В., Ожиганов Е. А. [и др.] Разработка комплекса средств технической диагностики, восстановления и упрочнения элементов горнодобывающего оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № S6. С. 447–456.
12. Абабков Н. В., Бенедиктов А. В., Смирнов А. Н. [и др.] Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 2. Спектрально-акустический метод контроля // Вестник КузГТУ. 2010. № 5. С. 101–106.
13. Смирнов А. Н., Козлов Э. В., Ожиганов Е. А. [и др.] Влияние степени деформации сварных соединений углеродистых сталей на структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений // Сварка и диагностика. 2016. № 3. С. 25–28.
14. Смирнов А. Н., Абабков Н. В., Глинка А. С. [и др.] Акустические и физико-механические показатели теплоустойчивой стали в окрестности трещины // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 10. С. 40–45.
15. Иванов Ю. Ф., Козлов Э. В. Объемная и поверхностная закалка конструкционной стали – морфологический анализ структуры // Изв. вузов. Физика. 2002. № 3. С. 5–23.
16. Смирнов А. Н., Князьков В. Л., Левашова Е. Е., Абабков Н. В., Пимонов М. В. Механические и акустические характеристики наплавленного и основного металла деталей машин карьерного транспорта // В сборнике : Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс. Сборник

научных трудов. Кемерово, 2017. С. 88–103.

17. Пимонов М. В., Романов Д. А., Чен Х. Исследование структуры поверхностного слоя стали 40Х после черновой и получистовой механической обработки резанием // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 2. С. 102–112.

18. Пимонов М. В., Романов Д. А., Чен Х.

Структура поверхностного слоя стали 40Х после финишных этапов механической обработки резанием // Физика и химия обработки материалов. 2020. № 4. С. 17–30.

19. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. М. : Машиностроение, 1979. 191 с.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Абабков Николай Викторович, заведующий кафедрой технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, с.н.с. Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского Отделения Российской академии наук, (650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10), к.т.н., доцент, e-mail: n.ababkov@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0794-8040>

Пимонов Максим Владимирович, доцент кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, с.н.с. Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского Отделения Российской академии наук, (650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10), к.т.н., e-mail: pimonovmv@kuzstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9509-4692>

Никитенко Михаил Сергеевич, доцент кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, заведующий лабораторией Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского Отделения Российской академии наук, (650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10), к.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>

Левашова Елена Евгеньевна, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: petrova.lena-petrova2010@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4551-9187>

Заявленный вклад авторов:

Абабков Николай Викторович – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, формулировка выводов, написание текста.

Пимонов Максим Владимирович – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Никитенко Михаил Сергеевич – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, обработка результатов, выводы, написание текста.

Левашова Елена Евгеньевна – сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

INFLUENCE OF MECHANICAL PROCESSING MODE ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE LAYER OF STRUCTURAL STEEL SAMPLES AFTER SURFACING

Nikolay V. Ababkov^{1,2}, Maxim V. Pimonov^{1,2},
Mikhail S. Nikitenko^{1,2}, Elena E. Levashova¹

¹ T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

² The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

* for correspondence: n.ababkov@rambler.ru

**Article info**

Received:

10 March 2025

Accepted for publication:

10 June 2025

Accepted:

20 June 2025

Published:

26 June 2025

Keywords: restoration by surfacing, cutting modes, structural steel; yield strength, hardness, average grain size, spectral-acoustic method.

Abstract.

Currently, a significant share of equipment in the mineral resource and fuel and energy complexes has exhausted its service life. For this reason, the development and study of methods for extending the service life of parts and metal structures using strengthening technologies and optimal mechanical processing modes to obtain the desired geometry. The paper presents original results of studies of samples after surfacing of the surface layer and its mechanical processing by cutting in various modes. The main parameters of the surface layer were analyzed, in particular, the hardness measured by the Vickers method, the microstructure of the deposited metal, and using non-destructive methods spectral-acoustic, acoustic characteristics were obtained. It is shown that the processing modes affect the microstructure of the surface layer. An increase in the grain size in the deposited metal leads to a decrease in the mechanical characteristics such as hardness and yield strength, which is caused by an increase in the thickness of the cut-off surface layer. The results of non-destructive testing are obtained and presented in the form of graphs of the dependence of the delay time of Rayleigh surface acoustic waves and average hardness values on the thickness of the cut-off layer of the deposited metal, as well as a graph of the dependence of the yield strength values on the delay time of the acoustic signal. The obtained results of experimental studies can be used to assess the quality of the surface layer of machine parts after renovation operations, including restoration and mechanical processing. In this case, the assessment of the microstructure, the presence or absence of surface defects, will be carried out without cutting out samples using the spectral-acoustic method of non-destructive testing.

For citation: Ababkov N.V., Pimonov M.V., Nikitenko M.S., Levashova E.E. Influence of mechanical processing mode on the microstructure and mechanical characteristics of the surface layer of structural steel samples after surfacing. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):50-58. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-50-58, EDN: WJJLYW

REFERENCES

1. Ababkov N.V., Pimonov M.V., Levashova E.E. Study of the microstructure and mechanical characteristics of the surface layer of samples after surfacing and mechanical treatment. *Innovations in the fuel and energy complex and mechanical engineering (TEK-2022): collection of works of the III International scientific and practical conference*. Kemerovo, April 19-21, 2022. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev; 2022. Pp. 218–224. EDN BXJCIY.
2. Korotkov V.A., Berdnikov A.A., Tolstov I.A. Restoration and hardening of parts and tools by plasma technologies. Chelyabinsk: Metal; 1993. 144 p. (In Russ.)
3. Lakhtin Yu.M., Leontieva V.P. Materials Science: Textbook for higher technical educational institutions. 3rd ed., revised and additional. M.: Mechanical Engineering; 1990. 528 p. (In Russ.)
4. Volkov O., Knyazev S., Subbotina V. [et al.] Construction of surface layers with special properties in the hardening of steels. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2022; 1235:012031. (In Eng.) DOI: 10.1088/1757-899X/1235/1/012031.
5. Gridin K.S., Chuikov D.A., Maltseva O.N. Analysis of technologies for restoring the "fist release" part of a KAMAZ car. *Technologies, machinery and equipment for the design and construction of agricultural facilities* : Collection of scientific articles of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, graduate students, masters and bachelors. 2023. Pp. 126–129. (In Russ.)
6. Gadalog V.N., Kovalenko I.A., Kutepov S.N., Skripkina Yu.V., Kalinin A.A. Monitoring the effect of vibration on the surface layers of structural metals and steels with an assessment of their mechanical and operational properties. *Izvestiya TulaSU. Technical sciences*. 2023; 1:172–176. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2023-3-172-177.
7. Smirnov A.N., Kozlov E.V. Gradient structures in metal cutting. Kemerovo: Siberian Publishing Group LLC; 2013. 179 p. (In Russ.)
8. Karaina Yu.I., Konkov V.Yu., Oparina T.A. Evaluation of the quality and mechanical properties of the obtained metal layers from low-carbon steel by the WAAM method using additional mechanical and ultrasonic processing. *Metaworking (technology, equipment, tools)*. 2024; 26(4):75–91. (In Russ.) DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-75-91.
9. Barannikova S.A., Nikonova A.M. Effect of electrolytic hydrogenation on mechanical and acoustic properties of stainless steel. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2024; 6:5–14. (In Russ.) DOI: 10.15593/perm.mech/2024.6.01.
10. Smirnov A.N., Kozlov E.V., Kupchenko M.V. [et al.] Modern methodological support for assessing the

metal condition of potentially dangerous equipment. Part 1. Microscopy and X-ray diffraction analysis. *Bulletin of KuzSTU*. 2010; 4:62–68. (In Russ.)

11. Nikitenko M.S., Knyazkov K.V., Ozhiganov E.A. [et al.] Development of a complex of technical diagnostic tools, restoration and hardening of mining equipment elements. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2013; S6:447–456. (In Russ.)

12. Ababkov N.V., Benediktov A.V., Smirnov A.N. [et al.] Modern methodological support for assessing the metal condition of potentially dangerous equipment. Part 2. Spectral acoustic control method. *Bulletin of KuzSTU*. 2010; 5:101–106. (In Russ.)

13. Smirnov A.N., Kozlov E.V., Ozhiganov E.A. [et al.] The influence of the degree of deformation of welded joints of carbon steels on the structural and phase state and fields of internal stresses. *Welding and diagnostics*. 2016; 3:25–28. (In Russ.)

14. Smirnov A.N., Ababkov N.V., Glinka A.S. [et al.] Acoustic and physico-mechanical parameters of heat-resistant steel in the vicinity of a crack. *Hardening technologies and coatings*. 2011; 10:40–45. (In Russ.)

15. Ivanov Yu.F., Kozlov E.V. Volumetric and surface hardening of structural steel – morphological analysis of structure. *Izv. vuzov. Physics*. 2002; 3:5–23. (In Russ.)

16. Smirnov A.N., Knyazkov V.L., Levashova E.E., Ababkov N.V., Pimonov M.V. Mechanical and acoustic characteristics of deposited and base metal parts of quarry transport machines. In the collection: *Structure. Tension. Diagnostics. Resource. Collection of scientific papers*. 2017. Pp. 88–103. (In Russ.)

17. Pimonov M.V., Romanov D.A., Chen H. Investigation of the structure of the surface layer of 40X steel after roughing and semi-finishing machining. *Surface. X-ray, synchrotron, and neutron studies*. 2021; 2:102–112. (In Russ.)

18. Pimonov M.V., Romanov D.A., Chen H. The structure of the surface layer of 40X steel after the final stages of mechanical processing by cutting. *Physics and Chemistry of materials processing*. 2020; 4:17–30. (In Russ.)

19. Markovets M.P. Determination of mechanical properties of metals by hardness. M.: Mashinostroenie; 1979. 191 p. (In Russ.)

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Nikolay V. Ababkov, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Vesennaya St., 28, Senior Researcher Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (FRC CCC SB RAS), (650065, Russia, Kemerovo, Leningradsky Ave., 10), PhD in Engineering (Cand. of Sc.), Associate Professor, e-mail: n.ababkov@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0794-8040>

Maxim V. Pimonov, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Vesennaya St., 28, Senior Researcher Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (FRC CCC SB RAS), (650065, Russia, Kemerovo, Leningradsky Ave., 10), PhD in Engineering (Cand. of Sc.), e-mail: pimonovmv@kuzstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9509-4692>

Mikhail S. Nikitenko, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev", Kemerovo, st. Vesennaya, 28, Head of Laboratory Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (FRC CCC SB RAS), (650065, Russia, Kemerovo, Leningradsky Ave., 10), PhD in Engineering (Cand. of Sc.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>

Elena E. Levashova, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Vesennaya St., 28, e-mail: petrova.lena-petrova2010@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4551-9187>

Contribution of the authors:

Nikolay V. Ababkov – formulation of the research problem, review of relevant literature, conceptualization of the study, formulation of conclusions, writing the text.

Maxim V. Pimonov – review of relevant literature, conceptualization of the study, collection and analysis of data, conclusions, writing the text.

Mikhail S. Nikitenko – scientific management, review of relevant literature, processing of results, conclusions, writing the text.

Elena E. Levashova – collection and analysis of data, conclusions, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

