



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.787

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-75-87

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ GCr15, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПОДВЕРГНУТЫХ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ И ШЛИФОВАНИЮ

Петроченко С.В.¹, Федоров А.А.², Макашин Д.С.², Михайленко С.В.²

¹ООО «Нинбоский научно-исследовательский институт интеллектуальных станков, входящий в группу Китайских национальных институтов машиностроения», Нинбо, Китай

²Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Проблема, связанная с повышением износостойкости и усталостной прочности деталей, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, является актуальной. Возросшие эксплуатационные требования перестают быть достигнутыми традиционными методами упрочнения деталей машин. В свою очередь, это может быть обеспечено за счет применения комбинированных методов поверхностного упрочнения, таких как лазерная закалка с последующей ультразвуковой упрочняющей обработкой. Однако на сегодняшний момент существует проблема, связанная с оптимизацией технологического процесса ультразвукового упрочнения деталей типа тел вращения, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифовке дефектного слоя. **Цель работы.** Поиск оптимальных значений технологических параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки деталей типа тел вращения, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифованию дефектного слоя для достижения требуемой шероховатости поверхности, максимальных значений остаточных напряжений сжатия и микротвердости на поверхности. **Используемые методы.** Основу экспериментальной части составил ротатбельный центральный композиционный план второго порядка. Измерения включали анализ шероховатости, остаточных напряжений и микротвердости на поверхности образцов. **Новизна.** Разработаны регрессионные зависимости для определения оптимальных значений технологических параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки тел вращения, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифованию дефектного слоя. **Результат.** Полученные зависимости позволяют с точностью не менее чем 95% определить значения параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки для обеспечения требуемых значений качества поверхностного слоя деталей, обеспечить высокую производительность процесса. **Практическая значимость.** Регрессионные зависимости могут быть использованы как для прогнозирования влияния технологических параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки на шероховатость, величину остаточных напряжений, микротвердость на поверхности, так и для поиска оптимальных значений параметров режима ультразвукового упрочнения шарикоподшипниковой стали GCr15.

Ключевые слова: ультразвуковая упрочняющая обработка, подшипниковая сталь, ротатбельный центральный композиционный план, шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения

Авторы выражают признательность за предоставленную возможность проведения экспериментальной части исследования и финансовую поддержку, оказанную в рамках проекта Yongjiang talent project, грант № CIE23AM0105, CIE23AM0106.

© Петроченко С.В., Федоров А.А., Макашин Д.С., Михайленко С.В., 2026

Для цитирования

Поиск оптимальных значений технологических параметров режима ультразвуковой упрочняющей обработки тел вращения, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифованию / Петроченко С.В., Федоров А.А., Макашин Д.С., Михайленко С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 75-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-75-87>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SEARCH FOR OPTIMAL VALUES OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE ULTRASONIC HARDENING TREATMENT MODE FOR ROTATIONAL BODIES MADE OF BEARING STEEL GCr15 PREVIOUSLY SUBJECTED TO LASER HARDENING AND GRINDING

Petrochenko S.V.¹, Fedorov A.A.², Makashin D.S.², Mikhailenko S.V.²

¹Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, China

²Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The problem of increasing the wear resistance and fatigue strength of parts made of GCr15 bearing steel is relevant. The increased operational requirements are no longer achieved by traditional methods of hardening machine parts. In turn, this can be achieved through the use of combined surface hardening methods such as laser hardening followed by ultrasonic hardening treatment. However, at the moment there is a problem related to the optimization of the technological process of ultrasonic hardening of parts such as rotational bodies previously subjected to laser hardening and grinding of the defective layer. **Objectives.** The study is aimed at ascertaining the optimal values of the technological parameters of the ultrasonic hardening treatment of parts such as rotational bodies made of bearing steel GCr15. These parts were previously subjected to laser hardening and grinding of the defective fused layer in order to achieve the required surface roughness, maximum values of residual compressive stresses and microhardness on the surface. **Methods Applied.** The basis of the experimental part is a second order rotatable central composite plan. The measurements include the analysis of roughness, residual stresses, and microhardness on the surface of the samples. **Originality.** Regression equations have been developed to determine the optimal values of the technological parameters of the ultrasonic hardening treatment of rotational bodies made of GCr15 bearing steel previously subjected to laser hardening and grinding of the defective layer. **Result.** The obtained equations make it possible to determine with an accuracy of at least 95% the values of the parameters of the ultrasonic hardening treatment mode to ensure the required quality values of the surface layer of the parts, to ensure high process productivity. **Practical Relevance.** Regression equations can be used to forecast the effect of the technological parameters of the ultrasonic hardening treatment mode on roughness, residual stress, and microhardness on the surface, as well as to find optimal values for the parameters of the ultrasonic hardening mode of GCr15 ball-bearing steel.

Keywords: ultrasonic hardening treatment, bearing steel, rotatable central composite plan, roughness, microhardness, residual stress

The authors are grateful for the opportunity to conduct the experimental part of the study and the financial support provided within the framework of the Yongjiang talent project, grant no. CIE23AM0105, CIE23AM0106.

For citation

Petrochenko S.V., Fedorov A.A., Makashin D.S., Mikhailenko S.V. Search for Optimal Values of Technological Parameters of the Ultrasonic Hardening Treatment Mode for Rotational Bodies Made of Bearing Steel GCr15 Previously Subjected to Laser Hardening and Grinding. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 75-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-75-87>

Введение

Сталь GCr15, являющаяся аналогом стали ШХ15, широко используется для изготовления деталей подшипников, прецизионных измерительных инструментов, штампов, вращающихся устройств, станков и автомобилей [1]. Всеобщая популярность этой стали в вышеуказанных областях применения обусловлена привлекательным сочетанием низкой стоимости, высокой прокаливаемости, высокой твердости (61-63 HRC), высокого предела текучести/растяжения (2000/2200 МПа), а также хорошей обрабатываемости и формруемости [2, 3]. Однако высокая степень истирания/износа часто усиливает трение, создает шум/вибрацию, требует своевременной замены и/или приводит к преждевременному выходу из строя.

Кроме того, при работе в тяжелых условиях эксплуатации и при больших нагрузках время от времени обнаруживается недостаточная контактная усталость и ударная вязкость в объеме. Для повышения износостойкости и усталостной прочности рабочих поверхностей деталей применяются традиционные методы термического упрочнения, сочетающие в себе сфероидизирующий отжиг, закалку и низкий отпуск [4, 5]. Несмотря на плюсы традиционных методов термического упрочнения, есть и недостатки, связанные с появлением закалочных трещин и деформации деталей, что недопустимо в особенности для тел вращения. Все эти недостатки могут быть нивелированы за счет применения ультразвуковой упрочняющей обработки, выполненной после лазерной закалки.

Ультразвуковая упрочняющая обработка (УУО) и ее разновидности (в частности, Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification – UNSM) может преодолеть недостаток, связанный с ухудшением качества поверхности [6-10]. Благодаря своей управляемости УУО может регулировать шероховатость поверхности в диапазоне от 0,04 до 0,5 мкм и создавать однородную пластическую деформацию и остаточные напряжения сжатия в приповерхностной области, предотвращая износ и распространение микротрещин.

Работа Yuon Y.S. и др. посвящена исследованию влияния UNSM-обработки на трибологические свойства подшипниковой стали, которая показала положительные результаты [11]. Naifeng Qin и др. исследовали влияние UNSM-обработки на износостойкость образцов и стойкость к микро- и макропиттингу [12]. Авторы отмечали наличие более тонкой кристаллической структуры на глубине около 4 мкм от поверхности, что соответствует измельченному мартенситу, полученному после обычной закалки и низкого отпуска. Также авторами оценено увеличение микротвердости образцов после UNSM-обработки в 1,3-1,4 раза по сравнению с исходными образцами. В работе Wang Y. и др. приведены результаты рентгеноструктурного анализа образцов после ультразвуковой прокатки (ultrasonic rolling) с исходной структурой до закалки и после закалки [13].

В приведенных авторами результатах говорится о том, что с повышением статической силы прижима инструмента высота дифракционного пика уменьшается, в то время как ширина дифракционного пика увеличивается, что свидетельствует о непрерывном измельчении зерен как для образцов до закалки, так и после нее. Результаты микроструктурного анализа обработанных образцов также показали измельчение зерен в приповерхностном слое после ультразвуковой прокатки, в особенности в образце после закалки.

Атапов А. и др. [14] в своей работе указали на повышенную деформацию кристаллической решетки в результате проведения UNSM при различных температурных режимах закаленной подшипниковой стали AISI 52100 (аналог ШХ15 и GCr15) и измельчение исходных мартенситных зерен и карбидных включений в приповерхностном слое. Кроме этого, авторы наблюдали формирование плотного слоя толщиной не более 5 мкм, который расценивался как «белый» слой. Хуе Xianmeng и др. [15] также отметили измельчение мартенситных зерен и их деформацию в направлении движения инструмента. Толщина упрочненного слоя после интенсивной пластической

деформации, вызванной ультразвуковой поверхностной накаткой, составляла 60 мкм. Высокая степень дислокации авторами объясняется вращением дислокационных ячеек с образованием малоугловых границ зерен и субзерен.

На сегодняшний день актуальными являются комбинированные способы упрочняющей обработки, способные значительно повысить качество несущего слоя [16]. В частности, многообещающим является сочетание лазерной закалки и ультразвуковой упрочняющей обработки [17-21]. Однако требует оптимизации процесс УУО для деталей типа тел вращения, предварительно обработанных лазером и шлифованным дефектным слоем.

Цель данной работы – поиск оптимальных значений технологических параметров режима УУО для тел вращения, изготовленных из подшипниковой стали GCr15, предварительно подвергнутых лазерной закалке и шлифованию дефектного оплавленного слоя для достижения шероховатости поверхности $Ra \leq 0,2$ мкм, максимальных значений остаточных напряжений сжатия и микротвердости на поверхности.

Материалы и методы исследования

Химический состав и механические свойства подшипниковой стали марки GCr15 представлены в табл. 1 и 2. Для проведения экспериментальных исследований из основного материала – отожженного прутка диаметром 50 мм – были изготовлены ролики, параметры которых приведены на рис. 1. Исходная шероховатость наружной цилиндрической поверхности перед лазерной закалкой роликов составляла $Ra = 0,08-0,09$ мкм.

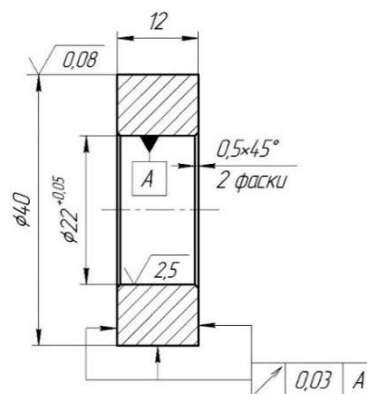


Рис. 1. Образец для проведения эксперимента
Fig. 1. A sample for conducting an experiment

Таблица 1. Химический состав стали GCr15
Table 1. Chemical composition of GCr15 steel

Марка стали	Содержание элементов	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
GCr15		0,99	0,24	0,29	0,021	0,001	1,46	0,04	0,02	0,01	основа

Таблица 2. Механические свойства стали GCr15
Table 2. Mechanical properties of GCr15 steel

Предел текучести, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Виккерсу
370–410	590-730	20	179-207

Экспериментальный процесс предварительной лазерной закалки был реализован на роботизированном комплексе LMS4000-70R-600A, в состав которого входят высокомощный диодный лазер LDF6000-30 (длина волны излучения — 1080 нм), оптическая головка OTZ-5VR, пирометр с системой терморегулирования LASCON, а также промышленный робот KUKA KR70R2100. Схематическое описание технологии лазерной закалки представлено на рис. 2. Параметры режима лазерной закалки, такие как скорость вращения образцов 15 мм/с, размер пучка 10×2 мм, мощность излучения 1500 Вт, назначались согласно ранее проведенным исследованиям [22]. Каждый образец закаливался за один оборот шпинделя установки с дискретным смещением оптической головки на шаг, равный ширине образца.

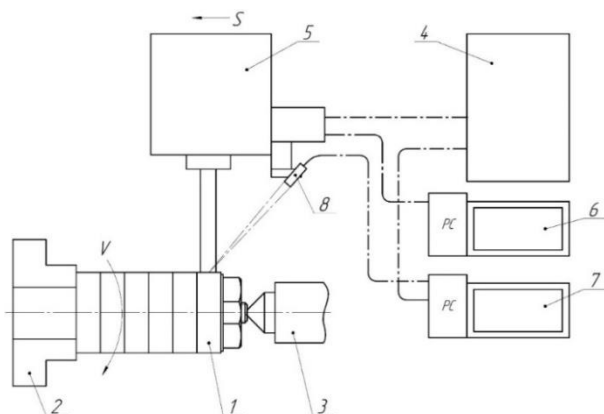


Рис. 2. Схема лазерной закалки: 1 – заготовка; 2 – патрон; 3 – задний центр; 4 – источник лазерного излучения; 5 – оптическая головка; 6 – контроллер ЧПУ; 7 – контроллер температуры; 8 – пирометр

Fig. 2. Laser hardening scheme: 1 is sample; 2 is chuck; 3 is rear center; 4 is laser radiation source; 5 is optical head; 6 is CNC controller; 7 is temperature controller; 8 is pyrometer

Для определения глубины дефектного слоя контрольный образец после лазерной закалки разрезался на две половины в плоскости, как представлено на рис. 1. Одна из поверхностей шлифовалась, трави-

лась до выявления микроструктуры. Инструментальным методом было определено, что глубина оплавленного слоя составила приблизительно 250-300 мкм. Далее все образцы шлифовались на глубину 300 мкм для удаления оплавленного слоя до шероховатости $Ra = 0,45-0,50$ мкм. Микротвердость на поверхности образцов перед УУО составила 610-620 HV.

УУО роликов проводилась согласно матрице планирования для ротatableльного центрального композиционного плана (РЦКП) второго порядка, предусматривающего двадцать опытов для количества факторов, равного трем [23]. Факторы, уровни, интервалы варьирования факторов и матрица планирования РЦКП второго порядка для трех факторов представлены в виде табл. 3 и 4.

В качестве варьируемых факторов были выбраны следующие параметры: скорость вращения образцов (V , мм/с) с кодированным значением (A); статическая сила прижима (F , Н) с кодированным значением (B), а также подача ультразвукового инструмента (S , мм/об) с кодированным значением (C). Уровни факторов и соответствующие интервалы их варьирования определены на основе результатов серии предварительных испытаний. Остальные технологические параметры УУО, включая частоту колебаний $f = 17500$ Гц и радиус вершины ультразвукового инструмента $r = 2,5$ мм, были зафиксированы как постоянные значения. В качестве выходных параметров (откликов) выступали показатель шероховатости поверхности Ra , мкм, микротвердость поверхности HV и уровень остаточных напряжений σ , МПа, в приповерхностном слое.

Ожидается, что применение РЦКП второго порядка для трехфакторного эксперимента позволит получить уравнения регрессии, включающие линейные, квадратичные члены и взаимодействия факторов. Такие модели описывают зависимость отклика от трех переменных с учетом их квадратов и парных взаимодействий, что характерно для полиномиальных регрессионных уравнений второго порядка. Коэффициенты уравнения определяются на основе экспериментальных данных, а структура модели обеспечивает минимизацию систематических ошибок, связанных с неадекватностью аппроксимации.

Таблица 3. Уровни, факторы и интервалы варьирования
Table 3. Levels, factors, and ranges of variation

Уровень фактора	Факторы		
	A (скорость вращения образцов V , мм/с)	B (статическая сила прижима F , Н)	C (подача ультразвукового инструмента S , мм/об)
Основной (0)	105	30	0,11
Интервал варьирования	50	10	0,03
Верхний (+1)	155	40	0,14
Нижний (-1)	55	20	0,08
В звездных точках:			
+1,68179	189	47	0,16
-1,68179	21	13	0,06

Таблица 4. Матрица планирования для ротatableльного центрального композиционного плана второго порядка
Table 4. The planning matrix for the second-order rotatable central composite plan

Номер опыта	Кодированные значения факторов			Отклики		
	A	B	C	Параметр шероховатости Ra, мкм	Остаточные напряжения σ, МПа	Поверхностная твердость HV
1	-1	-1	-1	Ra ₁	σ ₁	HV ₁
2	1	-1	-1	Ra ₂	σ ₂	HV ₂
3	-1	1	-1	Ra ₃	σ ₃	HV ₃
4	1	1	-1	Ra ₄	σ ₄	HV ₄
5	-1	-1	1	Ra ₅	σ ₅	HV ₅
6	1	-1	1	Ra ₆	σ ₆	HV ₆
7	-1	1	1	Ra ₇	σ ₇	HV ₇
8	1	1	1	Ra ₈	σ ₈	HV ₈
9	-1,68179	0	0	Ra ₉	σ ₉	HV ₉
10	1,68179	0	0	Ra ₁₀	σ ₁₀	HV ₁₀
11	0	-1,68179	0	Ra ₁₁	σ ₁₁	HV ₁₁
12	0	1,68179	0	Ra ₁₂	σ ₁₂	HV ₁₂
13	0	0	-1,68179	Ra ₁₃	σ ₁₃	HV ₁₃
14	0	0	1,68179	Ra ₁₄	σ ₁₄	HV ₁₄
15	0	0	0	Ra ₁₅	σ ₁₅	HV ₁₅
16	0	0	0	Ra ₁₆	σ ₁₆	HV ₁₆
17	0	0	0	Ra ₁₇	σ ₁₇	HV ₁₇
18	0	0	0	Ra ₁₈	σ ₁₈	HV ₁₈
19	0	0	0	Ra ₁₉	σ ₁₉	HV ₁₉
20	0	0	0	Ra ₂₀	σ ₂₀	HV ₂₀

$$y = b_0 + b_1A + b_2B + b_3C + b_{12}AB + b_{13}AC + b_{23}BC + b_{11}A^2 + b_{22}B^2 + b_{33}C^2, \quad (1)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ – коэффициенты получаемого уравнения регрессии.

Для построения регрессионных моделей и генерации контурных диаграмм поверхностей отклика использовался программный комплекс Design Expert 13. Графический анализ результатов и оптимизация режимов ультразвуковой обработки (УУО) подшипниковой стали GCr15 осуществлялись на основе методологии поверхности отклика, позволяющей установить корреляцию между входными технологическими параметрами и выходными характеристиками процесса. Статистическая достоверность разработанных регрессионных моделей была подтверждена посредством дисперсионного анализа (ANOVA). Программное обеспечение обеспечило трёхмерную визуализацию поверхностей отклика, а также предоставило возможности для интерактивного исследования графических зависимостей и уточнения оптимальных условий обработки.

УУО производилась на установке, собранной на базе токарно-винторезного станка. Схема УУО представлена на рис. 3. Нагрузка на образец осуществлялась за счет продольного перемещения динамического технологического модуля (ДТМ), установленного в резцедержателе станка, вдоль оси Y. Контроль нагрузки осуществлялся при помощи тарированной пружины.

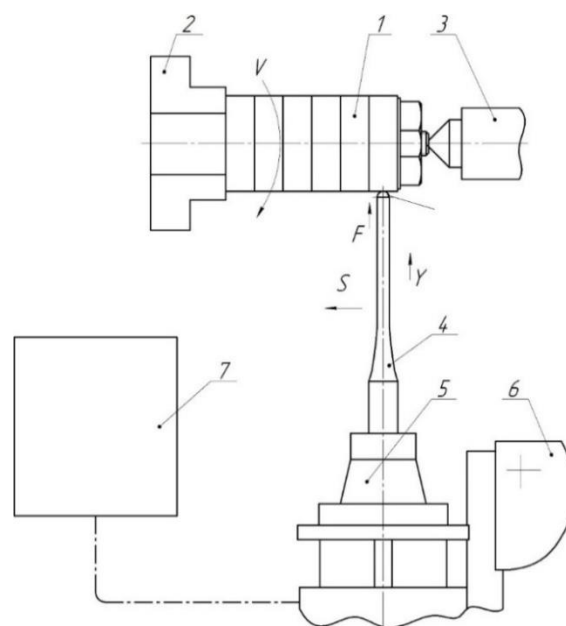


Рис. 3. Схема ультразвуковой упрочняющей обработки: 1 – заготовка; 2 – патрон; 3 – задний центр; 4 – ультразвуковой инструмент с полуцилиндрическим наконечником; 5 – магнитострикционный преобразователь в корпусе ДТМ; 6 – резцедержатель токарного станка; 7 – ультразвуковой генератор
Fig. 3. The scheme of ultrasonic hardening treatment: 1 is sample; 2 is chuck; 3 is rear center; 4 is ultrasonic tool with a semi-cylindrical tip; 5 is magnetostrictive transducer in the DTM housing; 6 is lathe tool holder; 7 is ultrasonic generator

Образцы были смонтированы на оправке, установленной в самоцентрирующий трехкулачковый токарный патрон. УУО производилась за счет перемещения ДТМ вдоль оси X относительно вращающейся заготовки с определённой величиной подачи. Параметры ультразвукового инструмента были выбраны следующие – наконечник в виде полуцилиндрической твердосплавной пластины шириной 5 мм. Обработка выполнялась за один проход. Технологические параметры режима УУО назначались согласно табл. 3 и 4.

Измерение шероховатости на поверхности образцов проводилось на профилометре модели TR-220 Time Group. Величина остаточных напряжений определялась на рентгеновском дифрактометре Xstress модели 3000G2 при использовании программного обеспечения XTronic.

Измерение поверхностной твердости осуществлялось с использованием твердомера HUA YIN HV-1000A. В качестве индентора применялась алмазная пирамида Виккерса, имеющая четырехгранную форму. Нагрузка величиной 500 г поддерживалась в течение 10 с. Для обеспечения достоверности результатов на каждом образце проводилось не менее пяти серий вдавливания. Для измерения поверхностной твердости роликов применялась методика, учитывающая кривизну поверхности. Скорректированная измеренная длина диагонали вычислялась по формуле

$$d_{corrected} = d_{measured} \cdot \left(1 + \frac{d_{measured}}{4R} \right), \quad (2)$$

где $d_{corrected}$ – скорректированная измеренная длина диагонали отпечатка, мм; $d_{measured}$ – измеренная длина диагонали, мм; R – радиус поверхности образца, мм.

Таблица 5. Результаты эксперимента
Table 5. Experimental results

Номер опыта	Кодированные значения факторов			Отклики		
	A	B	C	Параметр шероховатости Ra, мкм	Остаточные напряжения σ , МПа	Микротвердость на поверхности HV
1	-1	-1	-1	0,2204	-770	732
2	1	-1	-1	0,3038	-646,6	702
3	-1	1	-1	0,1926	-859,85	821
4	1	1	-1	0,1806	-792	770
5	-1	-1	1	0,2692	-656,2	741
6	1	-1	1	0,4412	-647,95	712
7	-1	1	1	0,2184	-678,3	754
8	1	1	1	0,2412	-730,1	728
9	-1,68179	0	0	0,2022	-783	803
10	1,68179	0	0	0,2776	-654	707
11	0	-1,68179	0	0,34	-584	647
12	0	1,68179	0	0,2126	-664,45	729
13	0	0	-1,68179	0,1596	-1001,43	829
14	0	0	1,68179	0,3442	-761,4	744
15	0	0	0	0,2056	-815,4	775
16	0	0	0	0,21	-803,5	767
17	0	0	0	0,198	-827,7	778
18	0	0	0	0,204	-800,1	768
19	0	0	0	0,203	-820,7	769
20	0	0	0	0,202	-815,2	771

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты эксперимента по поиску оптимальных технологических параметров режима УУО представлены в табл. 5.

Полученные результаты дисперсионного анализа, представленные в табл. 6, включают значения F -критерия и p -критерия для каждого исследуемого фактора. На основании анализа указанных показателей была установлена статистическая значимость отдельных факторов процесса.

На основе проведенного дисперсионного анализа установлено, что параметр шероховатости Ra зависит от всех трех исследуемых факторов, демонстрируя высокую статистическую значимость (значение p -критерия $< 0,0001$) (см. табл. 6). Основное влияние на увеличение Ra оказывает скорость вращения, что связано со снижением жесткости системы станок-приспособление-инструмент-деталь и возрастанием вибраций во время обработки. Статическая сила прижима влияет на шероховатость за счет выглаживающего эффекта: при ее увеличении вершины микровыступов сглаживаются, что уменьшает Ra . Однако квадратичная зависимость силы прижима также оказывает существенное влияние (значение p -критерия = 0,0002), что указывает на нелинейность процесса. Следует учитывать риск перенаклепа при чрезмерном повышении силы, который может вызвать шелушение поверхности и резкий рост Ra . Кроме того, увеличение подачи ультразвукового инструмента приводит к усугублению шероховатости из-за расширения шага сканирования, что снижает точность обработки.

Таблица 6. Результаты дисперсионного анализа
Table 6. ANOVA results

Фактор	Отклики					
	Шероховатость поверхности Ra		Величина остаточных напряжений σ		Поверхностная микротвердость HV	
	Значение F -критерия	Значение p -критерия	Значение F -критерия	Значение p -критерия	Значение F -критерия	Значение p -критерия
A (скорость вращения образца)	40,78	< 0,0001	16,12	0,0025	49,74	< 0,0001
B (статическая сила прижима)	100,20	< 0,0001	27,32	0,0004	58,99	< 0,0001
C (подача ультразвукового инструмента)	89,75	< 0,0001	69,93	< 0,0001	30,51	0,0003
AB	26,96	0,0004	2,76	0,1273	0,3110	0,5894
AC	6,86	0,0256	11,41	0,0070	0,6488	0,4393
BC	4,49	0,0602	3,55	0,0889	15,72	0,0027
A^2	8,26	0,0165	32,15	0,0002	2,80	0,1254
B^2	33,73	0,0002	117,03	< 0,0001	91,24	< 0,0001
C^2	14,76	0,0033	10,41	0,0091	4,13	0,0695

Влияние технологических параметров режима УУО на остаточные напряжения при постоянной амплитуде и частоте колебаний инструмента следующее:

– при уменьшении подачи ультразвукового инструмента относительно вращающейся заготовки уменьшается степень перекрытия соседних точек контакта инструмента и заготовки, проработка поверхности происходит более качественно, инструмент дольше воздействует на зону обработки, усиливая деформацию [24];

– изменение силы статического прижима в диапазоне выбранных экспериментальных значений от 13 до 30 Н в натуральных значениях фактора указывает на тенденцию к росту сжимающих напряжений, что объясняется повышением степени деформации; дальнейшее повышение статической силы прижима приводит к уменьшению сжимающих напряжений, что по большей части объясняется уменьшением влияния амплитуды колебаний инструмента и трансформацией ультразвуковой ударной обработки в ультразвуковую выглаживающую [25];

– скорость вращения заготовки в выбранных пределах не оказывает столь значительного влияния на величину остаточных напряжений, по сравнению со степенью влияния статической силы прижима и подачи ультразвукового инструмента, однако есть опасность, что слишком высокая скорость обработки может привести к возникновению вибраций и неравномерному распределению напряжений.

Таблица 7. Значения коэффициентов детерминации
Table 7. Values of the coefficients of determination

Коэффициент детерминации	Отклики		
	Шероховатость поверхности Ra	Величина остаточных напряжений σ	Микротвердость на поверхности HV
Значение коэффициента детерминации R^2	0,9695	0,9669	0,9626
Скорректированное значение коэффициента детерминации R^2	0,9420	0,9371	0,9289
Прогнозируемое значение коэффициента детерминации R^2	0,7672	0,7669	0,7289

Поверхностная микротвердость зависит от всех трех факторов в первом порядке, а также в значительной степени от квадрата статической силы прижима, так как именно повышение статической силы прижима при постоянной амплитуде колебаний инструмента способствует большей пластической деформации зерен в приповерхностном слое [26].

По результатам регрессионного анализа были получены уравнения регрессии второго порядка (3)-(5) и определены значения коэффициентов детерминации (табл. 7).

$$Ra = 0,20238 + 0,0288A - 0,0451B + 0,0427C - 0,0306AB + 0,0154AC - 0,0125BC + 0,0126A^2 + 0,0255B^2 + 0,0169C^2; \quad (3)$$

$$\sigma = -814,23 + 26,70A - 34,77B + 55,62C - 29,35AC + 16,37BC + 36,71A^2 + 70,04B^2 - 20,89C^2; \quad (4)$$

$$HV = 771,22 - 21,78A + 23,72B - 17,06C - 160BC + 6,11C^2. \quad (5)$$

Для перехода от кодированных значений к натуральным используются выражения

$$V = 105 + 50A; \quad (6)$$

$$F = 30 + 10B; \quad (7)$$

$$S = 0,11 + 0,03C. \quad (8)$$

Прогнозируемые значения коэффициентов детерминации R^2 , равные 0,7672, 0,7669 и 0,7289 соответственно, находятся в разумном соответствии со скорректированными значениями R^2 , равными 0,942, 0,9371 и 0,9289 соответственно, то есть разница составляет менее 0,2.

Полученные уравнения регрессии могут быть использованы при поиске оптимальных значений технологических параметров УУО после предваритель-

ной лазерной закалки и шлифования, а также прогнозирования полученных откликов при желаемых значениях скорости обработки, статической силы прижима и величины подачи ультразвукового инструмента с погрешностью не более 5%.

Поиск оптимальных значений технологических параметров осуществлялся с применением метода поверхностного отклика. Контурные кривые поверхностей равного отклика приведены на рис. 4-6.

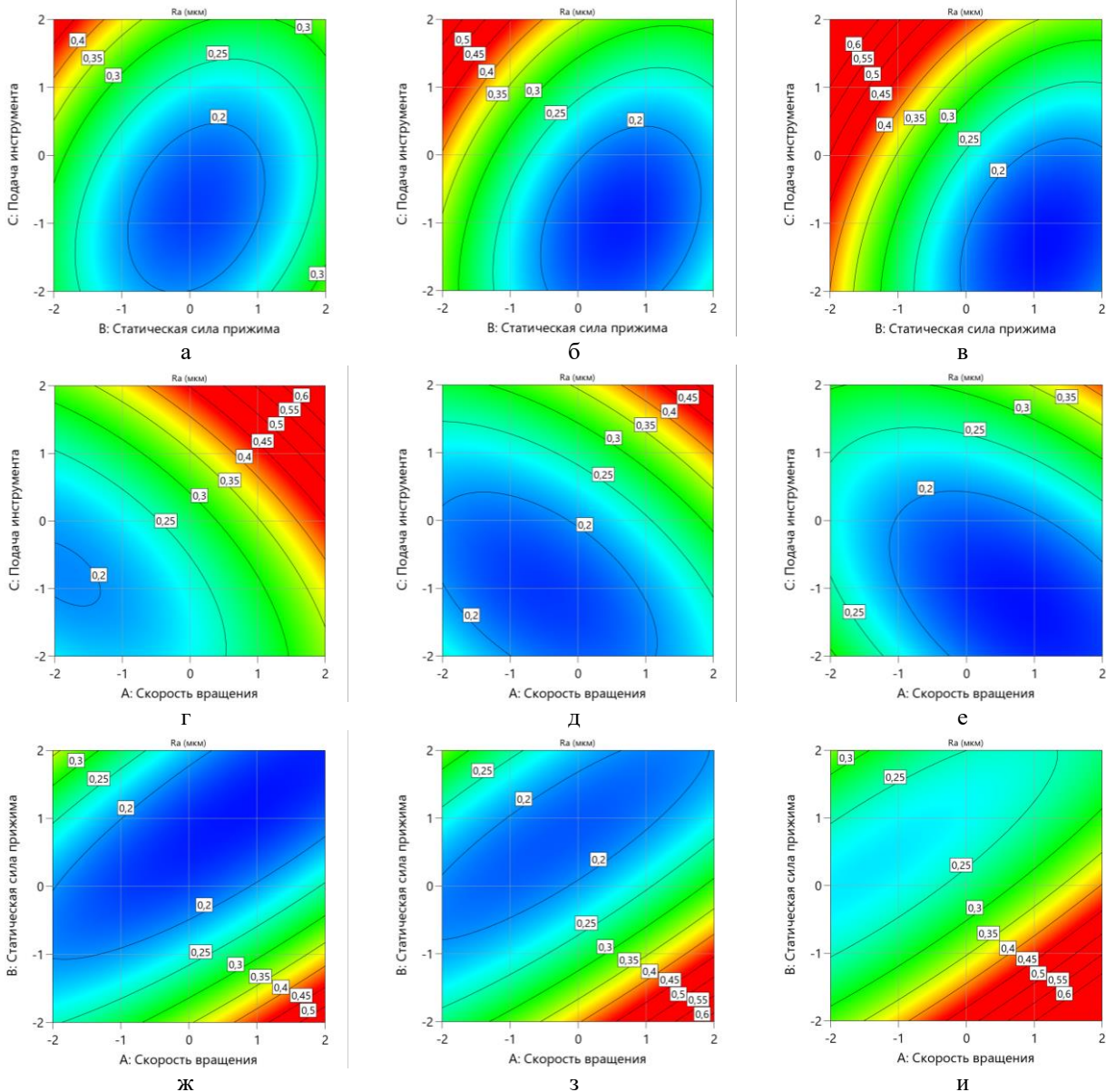


Рис. 4. Контурные кривые поверхностей равного отклика для параметра шероховатости R_a :
 а – А = -1; б – А = 0; в – А = +1; г – В = -1; д – В = 0; е – В = +1; ж – С = -1; з – С = 0; и – С = +1
 Fig. 4. Contour curves of the top of the equal response for the roughness parameter R_a :
 а is A = -1; б is A = 0; в is A = +1; г is B = -1; д is B = 0; е is B = +1; ж is C = -1; з is C = 0; и is C = +1

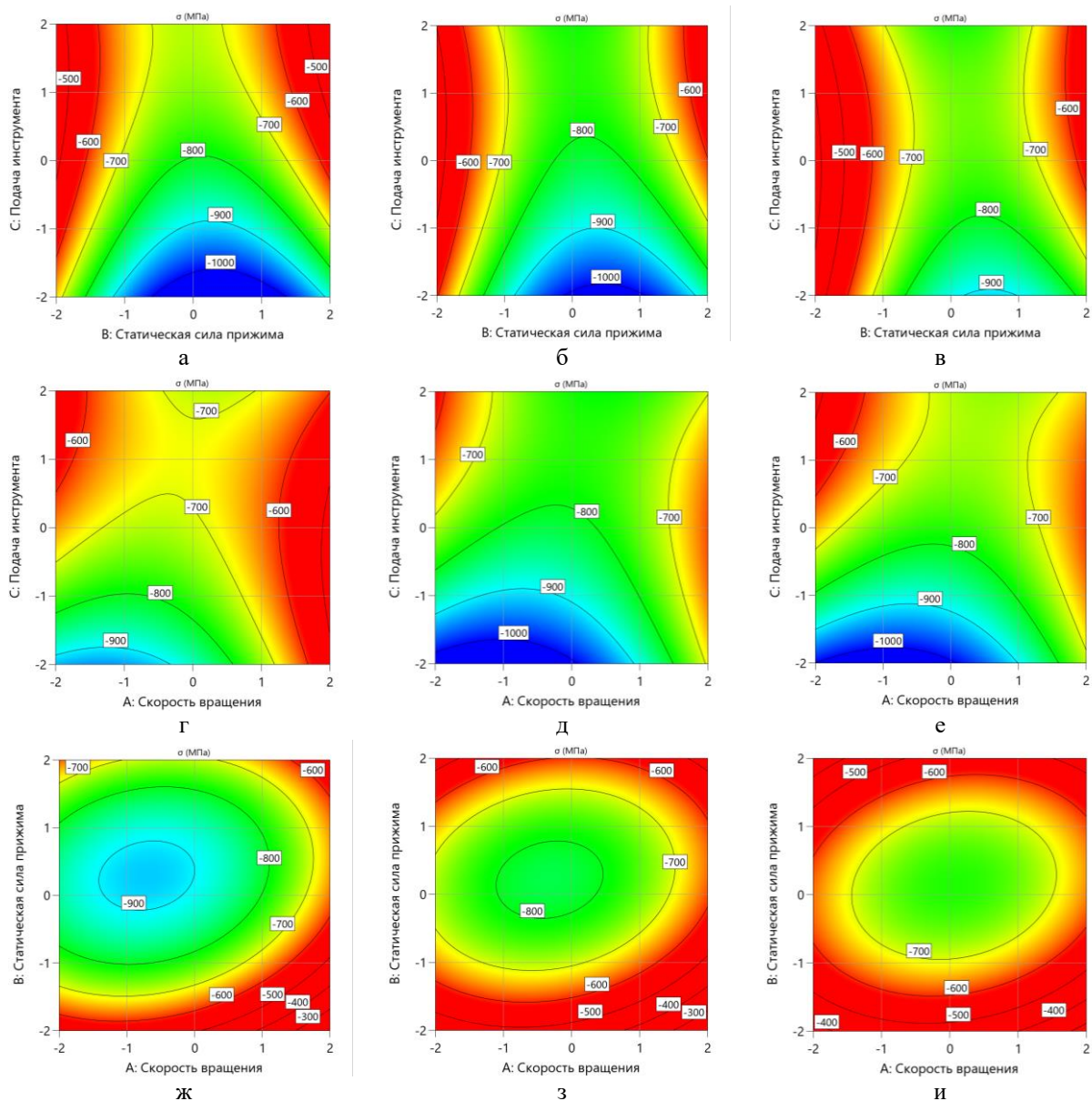


Рис. 5. Контурные кривые поверхностей равного отклика для остаточных напряжений σ :
 а – $A = -1$; б – $A = 0$; в – $A = +1$; г – $B = -1$; д – $B = 0$; е – $B = +1$; ж – $C = -1$; з – $C = 0$; и – $C = +1$

Fig. 5. Contour curves of the top of the equal response for the residual stress σ :

a is $A = -1$; б is $A = 0$; в is $A = +1$; г is $B = -1$; д is $B = 0$; е is $B = +1$; ж is $C = -1$; з is $C = 0$; и is $C = +1$

С целью определения оптимальных технологических параметров режима ультразвуковой обработки (УУО) были разработаны совмещенные контурные диаграммы поверхностей отклика, представленные на рис. 7.

При поиске оптимальных технологических параметров УУО были заданы следующие ограничения:

- параметр шероховатости $Ra \leq 0,2$ мкм;
- остаточные напряжения $\sigma \leq -700$ МПа;
- микротвердость на поверхности $HV \geq 750$.

С учетом обеспечения значений откликов в вышеуказанных пределах максимальная производительность обработки обеспечивается при значениях скорости вращения заготовки $V = 125$ мм/с (0,401 в кодированном значении фактора), статической силы прижима $F = 37$ Н (0,611) и величины подачи инструмента $S = 0,117$ (0,228), при этом параметр шероховатости составляет $Ra = 0,2$ мкм, остаточные напряжения $\sigma = -773$ МПа, микротвердость на поверхности $HV = 762$.

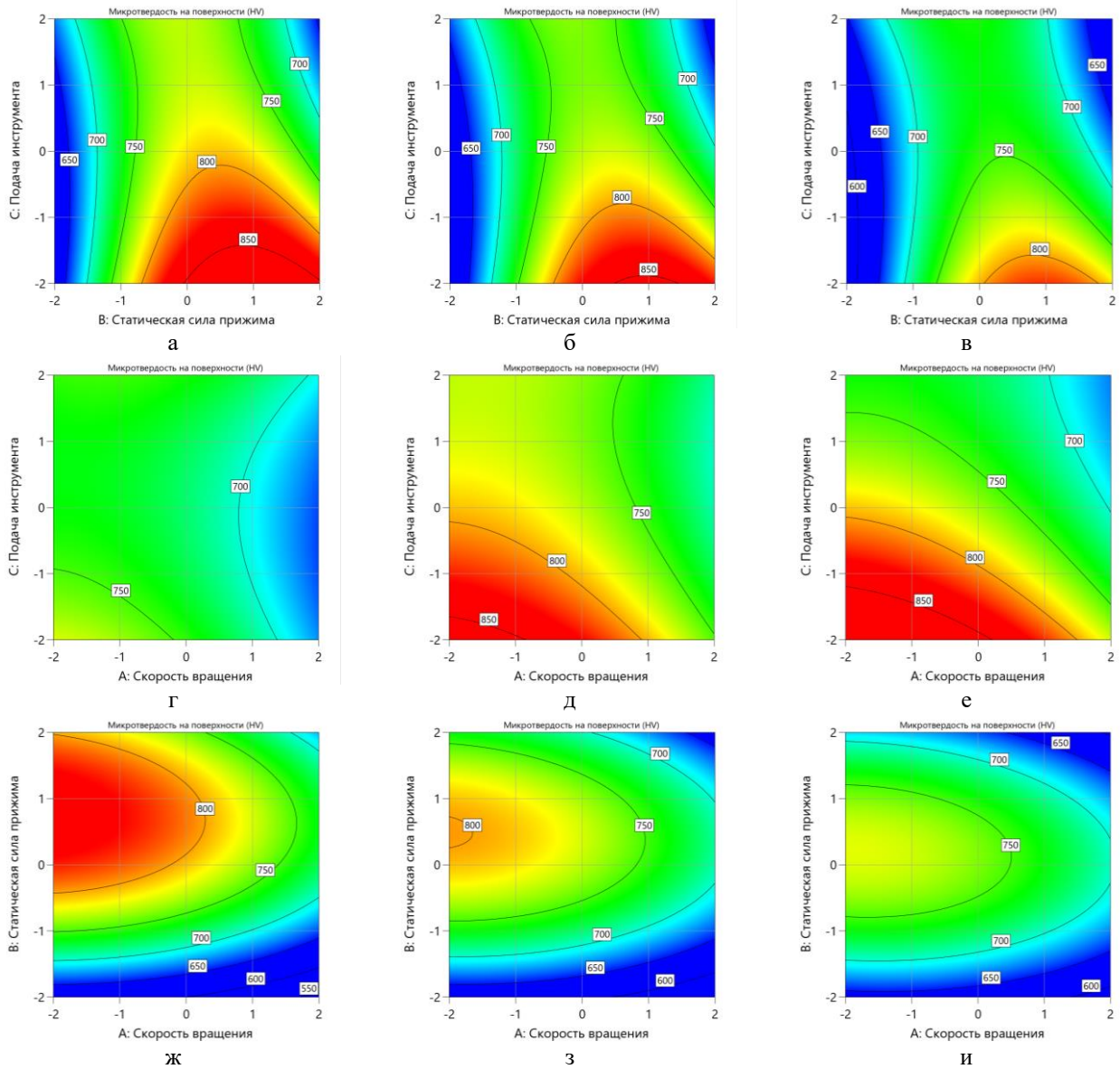


Рис. 6. Контурные кривые поверхностей равного отклика для микротвердости на поверхности:
 а – $A = -1$; б – $A = 0$; в – $A = +1$; г – $B = -1$; д – $B = 0$; е – $B = +1$; ж – $C = -1$; з – $C = 0$; и – $C = +1$
 Fig. 6. Contour curves of the top of the equal response for the surface microhardness:
 а is $A = -1$; б is $A = 0$; в is $A = +1$; г is $B = -1$; д is $B = 0$; е is $B = +1$; ж is $C = -1$; з is $C = 0$; и is $C = +1$

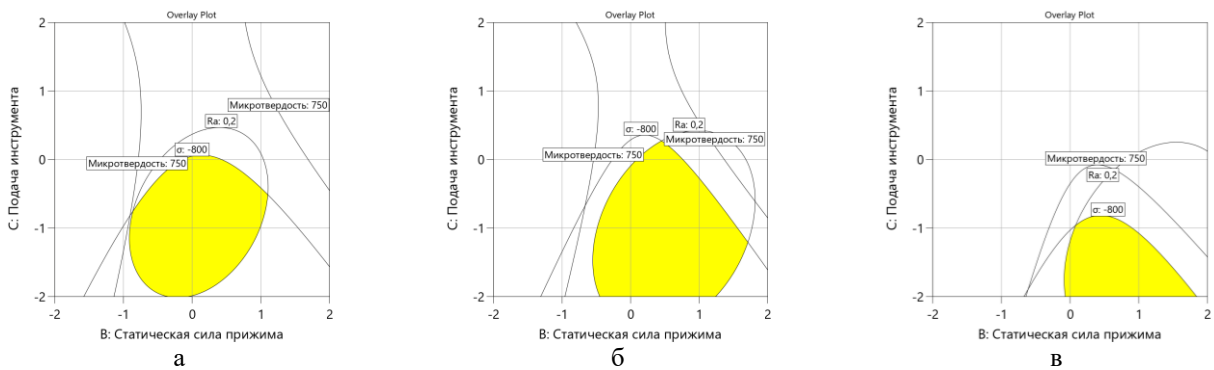


Рис. 7. Совмещенные контурные кривые поверхностей равного отклика: а – $A = -1$; б – $A = 0$; в – $A = +1$
 Fig. 7. Combined contour curves of surfaces of equal response: а is $A = -1$; б is $A = 0$; в is $A = +1$

Заключение

Был проведён промышленный эксперимент для определения оптимальных параметров ультразвуковой упрочняющей обработки (УУО).

Результаты дисперсионного анализа показали:

– комплексное влияние скорости обработки, статического усилия прижима инструмента и подачи на параметр шероховатости поверхности Ra ;

– значительное воздействие статической силы прижима и величины подачи инструмента на уровень остаточных сжимающих напряжений;

– существенное влияние квадрата статического усилия прижима на поверхностную микротвёрдость.

На основе регрессионного анализа были созданы адекватные математические модели, позволяющие прогнозировать влияние технологических параметров УУО на качество поверхностного слоя деталей вращения из подшипниковой стали GCr15, прошедших процесс лазерной закалки и шлифования слоя заготовки, имеющего дефекты.

Также установлены оптимальные значения параметров упрочняющей обработки, обеспечивающие заданные характеристики поверхности: шероховатость $Ra \leq 0,2$ мкм, максимальные остаточные напряжения сжатия $\sigma = -773$ МПа и высокую поверхностную твёрдость $HV = 762$.

Список источников

- Сапунов С.В. *Материаловедение*. СПб.: Лань, 2025. 208 с.
- Земсков Ю.П. *Материаловедение*. СПб.: Лань, 2024. 188 с.
- Богодухов С.И., Козик Е.С. *Материаловедение*. М.: Машиностроение, 2023. 504 с.
- Галимов, Э.Р., Абдуллин А.Л. *Современные конструкционные материалы для машиностроения*. СПб.: Лань, 2025. 268 с.
- Иванов, И.А., Губенко С.И., Кононов Д.П. *Поверхность деталей машин и механизмов*. СПб.: Лань, 2022. 156 с.
- Gradient nanostructure and residual stresses induced by ultrasonic nano-crystal surface modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility / C. Ye, A. Telang, A.S. Gill, S. Suslov et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2019, no. 613, pp. 274–288.
- Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the microstructural evolution of Inconel 690 alloy / K. Li, Y. He, I.H. Cho, C.S. Lee et al. // *Materials and Manufacturing Processes*. 2015, no. 30, pp. 194–198.
- Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy / A. Amanov, Y.S. Pyun, S. Sasaki // *Tribology International*. 2014, no. 72, pp. 187–197.
- Surface amorphization of NiTi alloy induced by ultrasonic nanocrystal surface modification for improved mechanical properties / C. Ye, X. Zhou, A. Telang, H. Gao et al. // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2016, no. 53, pp. 455–462.
- Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the water droplet erosion performance of Ti-6Al-4V / A.K. Gujba, Z. Ren, Y. Dong, C. Ye et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2016, no. 307, pp. 157–170.
- Tribological characteristics of radial journal bearings by ultrasonic nano-crystal surface modification technology / Y. Pyun, J.H. Park, C.M. Suh, I. Cho et al. // *International Journal of Modern Physics B*. 2010, no. 24, pp. 3011–3016.
- Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the wear and micropitting behavior of bearing steel in boundary lubricated steel-steel contacts / H. Qin, Z. Ren, J. Zhao, C. Ye et al. // *Wear*. 2017, no. 392–393, pp. 177–186.
- Effect of ultrasonic rolling on the surface integrity and corrosion properties of GCr15 steel before and after quenching / Y. Wang, J. Lin, Y.S. Wang, X. Fu // *Materials Research Express*. 2022, no. 9, art. 056505.
- A Study on Surface Hardening and Wear Resistance of AISI 52100 Steel by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification and Electrolytic Plasma Surface Modification Technologies / N. Magazov, Z. Satbaeva, B. Rakhadilov, A. Amanov // *Materials*. 2023, no. 16, art. 6824.
- Surface Microstructure Refinement and Mechanical Properties of GCr15 Steels Improved During Ultrasonic Surface Rolling Processing / X. Xue, S. Xu, X. Ma, J. Han, W. Zheng // *Materials Research*. 2023, vol. 26, art. e20220606.
- Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие / Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гончарь И.Н., Волчихина Н.И., Шорина Н.С.; под общ. ред. Н.Е. Денисовой. Пенза: Пензенский государственный университет, 2006. 248 с.
- Comparison of Effects of Laser, Ultrasonic, and Combined Laser-Ultrasonic Hardening Treatments on Surface Properties of AISI 1045 Steel Parts / D. Lesyk, W. Alnusirat, S. Martínez, B. Mordiyuk et al. // *Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2022, pp. 313–322.
- Rolling contact fatigue behaviors of 25CrNi2MoV steel combined treated by discrete laser surface hardening and ultrasonic surface rolling / X. Hu, S. Qu, Z. Chen, P. Zhang, Z. Lu et al. // *Optics and Laser Technology*. 2022, no. 155, art. 108370.
- Layered hardening and grain structure refinement of low-alloyed tool steel applying two-stage surface morphology modification by laser phase transformation and ultrasonic peening / D. Lesyk, V. Dzhemelinskiy, B. Mordiyuk, S. Martínez et al. // *MRS Advances*. 2023, no. 8, pp. 988–995.
- Surface quality improvement of steel parts by combined laser-ultrasonic treatment: determination algorithm of technological parameters / D. Lesyk, V. Dzhemelinskiy, B. Mordiyuk, S. Martínez et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023, no. 2, pp. 17–26.
- Ultrasonic Surface Finishing of AISI 1045 Steel Hardened by Laser Heat Treatment with Fibre Laser and Scanning Optics: Layered-Structure-Induced Hardening and Enhanced Surface Morphology / D. Lesyk, B. Mordiyuk, W. Alnusirat, S. Martínez et al. // *Progress in Physics of Metals*. 2024, no. 25, pp. 822–867.

22. Finding Optimal Modes of Laser Hardening of GCr15 Bearing Steel / S.V. Petrochenko, Q. Hao, X. Yu, K. Zhao // Russian Engineering Research. 2025, no. 45, pp. 346–353.
23. Набатов В.В. Методы научных исследований. М.: МИСиС, 2020. 328 с.
24. Федоров А.А., Петроченко С.В. Спектральный метод контроля деталей после ультразвуковой упрочняющей обработки. Ч. 1 // Контроль. Диагностика. 2014. № 6. С. 65-72.
25. Полонянкин Д.А., Федоров А.А., Гомонюк Т.М. Влияние статической нагрузки на структурно-фазовый состав нержавеющей стали 12Х18Н10Т, подвергнутой ультразвуковому нанокристаллическому поверхностному модифицированию // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23, № 1. С. 92-102.
26. Петроченко С.В., Федоров А.А. Технология повышения качества рабочей поверхности коллекторов машин постоянного тока при ее механической обработке // Омский научный вестник. 2014. № 1(127). С. 113-117.
11. Pyun Y., Park J.H., Suh C.M., Cho I. et al. Tribological characteristics of radial journal bearings by ultrasonic nanocrystal surface modification technology. International Journal of Modern Physics B. 2010;(24):3011-3016.
12. Qin H., Ren Z., Zhao J., Ye C et al. Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the wear and micro-pitting behavior of bearing steel in boundary lubricated steel-steel contacts. Wear. 2017;(392-393):177-186.
13. Wang Y., Lin J., Wang Y.s., Fu. X. Effect of ultrasonic rolling on the surface integrity and corrosion properties of GCr15 steel before and after quenching. Materials Research Express. 2022;(9):056505.
14. Magazov N., Satbaeva Z., Rakhadilov B., Amanov A. A Study on surface hardening and wear resistance of AISI 52100 steel by ultrasonic nanocrystal surface modification and electrolytic plasma surface modification technologies. Materials. 2023;(16):6824.
15. Xue X., Xu S., Ma X., Han J., Zheng W. Surface microstructure refinement and mechanical properties of GCr15 steels improved during ultrasonic surface rolling processing. Materials Research. 2023;(26):e20220606.
16. Denisova N.E., Shorin V.A., Gontar I.N., Volchikhina N.I., Shorina N.S. *Tribotekhnicheskoye materialovedenie i tribotekhnologiya: ucheb. posobie* [Tribotechnical materials and tribotechnology: textbook]. Penza : Publishing House of Penza State University, 2006, 248 p. (In Russ.)
17. Lesyk D., Alnusirat W., Martínez S., Mordyuk B. et al. Comparison of effects of laser, ultrasonic, and combined laser-ultrasonic hardening treatments on surface properties of AISI 1045 steel parts. Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022, pp. 313-322.
18. Hu X., Qu S., Chen Z., Zhang P., Lu Z. et al. Rolling contact fatigue behaviors of 25CrNi2MoV steel combined treated by discrete laser surface hardening and ultrasonic surface rolling. Optics and Laser Technology. 2022;(155):108370.
19. Lesyk D., Martínez S., Mordyuk B., Dzhemelinskyi V. et al. Layered hardening and grain structure refinement of low-alloyed tool steel applying two-stage surface morphology modification by laser phase transformation and ultrasonic peening. MRS Advances. 2023;(8):988-995.
20. Lesyk D., Dzhemelinskyi V., Mordyuk B., Martínez S. et al. Surface quality improvement of steel parts by combined laser-ultrasonic treatment: determination algorithm of technological parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023;(2):17-26.
21. Lesyk D., Mordyuk B., Alnusirat W., Martínez S. et al. Ultrasonic surface finishing of AISI 1045 steel hardened by laser heat treatment with Fibre Laser and Scanning Optics: layered-structure-induced hardening and enhanced surface morphology. Progress in Physics of Metals. 2024;(25):822-867.
22. Petrochenko S.V., Hao Q., Yu X., Zhao K. Finding Optimal Modes of Laser Hardening of GCr15 Bearing Steel. Russian Engineering Research. 2025;(45):346-353.
23. Nabatov V.V. *Metody nauchnykh issledovaniy* [Methods of scientific research]. Moscow: MISIS, 2020, 328 p. (In Russ.)
24. Fedorov A.A., Petrochenko S.V. Spectral method of inspection of parts after ultrasonic hardening treatment Part 1. *Kontrol. Diagnostika* [Control. Diagnostics]. 2014;(6): 65-72. (In Russ.)

References

1. Sapunov S.V. *Materialovedeniye* [Materials Science]. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2025, 208 p. (In Russ.)
2. Zemskov Yu.P. *Materialovedeniye* [Materials Science]. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2024, 188 p. (In Russ.)
3. Bogodukhov S.I., Kozik E.S. *Materialovedeniye* [Materials Science]. Moscow: Mashinostroenie, 2023, 504 p. (In Russ.)
4. Galimov E.R., Abdullin A.L. *Sovremennyye konstruktivnyye materialy dlya mashinostroeniya* [Modern structural materials for mechanical engineering]. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2025, 268 p. (In Russ.)
5. Ivanov I.A., Gubenko S.I., Kononov D.P. *Poverkhnost detalei mashin i mekhanizmov* [The surface of machine parts and mechanisms]. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2022, 156 p. (In Russ.)
6. Ye C., Telang A., Gill A.S., Suslov S. et al. Gradient nanostructure and residual stresses induced by ultrasonic nano-crystal surface modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility. Materials Science and Engineering: A. 2019;(613):274-288.
7. Li K., He Y., Cho I.H., Lee C.S. et al., Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the microstructural evolution of Inconel 690 alloy. Materials and Manufacturing Processes. 2015;(30):194-198.
8. Amanov A., Pyun Y.S., Sasaki S. Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy. Tribology International. 2014;(72):187-197.
9. Ye C., Zhou X., Telang A., Gao H. et al. Surface amorphization of NiTi alloy induced by ultrasonic nanocrystal surface modification for improved mechanical properties. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2016;(53):455-462.
10. Gujba A.K., Ren Z., Dong Y., Ye C. et al. Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the water droplet erosion performance of Ti-6Al-4V. Surface and Coatings Technology. 2016;(307):157-170.

25. Polonyankin D.A., Fedorov A.A., Gomonyuk T.M. The effect of static load on the structural and phase composition of 12Kh18N10T stainless steel subjected to ultrasonic nanocrystalline surface modification. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(1): 92-102. (In Russ.)
26. Petrochenko S.V., Fedorov A.A. Technology for improving the quality of the working surface of DC collectors during its mechanical processing. *Omskiy nauchniy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2014;(1(127)):113-117. (In Russ.)

Поступила 15.08.2025; принята к публикации 29.09.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 15/08/2025; revised 29/09/2025; published 31/03/2026

Петроченко Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, директор по исследованиям и разработкам, ведущий научный сотрудник, ООО «Нинбоский научно-исследовательский институт интеллектуальных станков, входящий в группу Китайских национальных институтов машиностроения», Нинбо, Китай.
Email: c.o.r.d.84@mail.ru. ORCID 0000-0001-5600-835X

Федоров Алексей Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: aafedorov83@rambler.ru. ORCID 0000-0002-6681-087X

Макашин Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: dima.makashin@gmail.com. ORCID 0000-0002-8297-5551

Михайленко Степан Викторович – ассистент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: stepan_01.01@mail.ru. ORCID 0000-0002-6806-9915

Sergei V. Petrochenko – PhD (Eng.), Research and Development Director, Lead Researcher, Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, China.
Email: c.o.r.d.84@mail.ru. ORCID 0000-0001-5600-835X

Aleksei A. Fedorov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: aafedorov83@rambler.ru. ORCID 0000-0002-6681-087X

Dmitrii S. Makashin – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: dima.makashin@gmail.com. ORCID 0000-0002-8297-5551

Stepan V. Mikhailenko – Assistant of the Department of Metal Cutting Machines and Tools, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: stepan_01.01@mail.ru. ORCID 0000-0002-6806-9915