



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №4 (178). С. 20-28.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №4 (178). P. 20-28.

Научная статья

УДК 621.7/620.3

doi: 10.30987/2223-4608-2026-4-28-28

### Зависимость качества шлифованных поверхностей детали от содержания остаточного аустенита в поверхностном слое цементированной закаленной стали

Виктор Васильевич Федотов<sup>1</sup>, инженер

Евгений Степанович Киселев<sup>2</sup>, д.т.н.

<sup>1</sup> Филиал Самарского государственного технического университета, Сызрань, Россия

<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

<sup>1</sup> tms10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>2</sup> kec.ulstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

**Аннотация.** Рассмотрены особенности обработки шлифованием заготовок из закаленных цементруемых сталей. Рост относительного содержания остаточного аустенита в поверхностном слое цементированной закаленной легированной стали способствует увеличению пластичных свойств материала и приводит к снижению его твердости, что существенно ухудшает функциональные эксплуатационные характеристики обработанной поверхности по усталостной прочности и износостойкости. Учитывая, что основная часть деталей различных машин и механизмов, работающих в условиях повышенного фрикционного взаимодействия, изготавливается из цементированных сталей, исследование по данной теме является актуальным для различных отраслей промышленности. Цель данного исследования состоит в оценке изменений процентного содержания остаточного аустенита в обработанной поверхности после проведения шлифовальной операции с различными условиями обработки. Проведенные исследования дали возможность установить рациональный режим шлифования, обеспечивающий минимальное содержание остаточного аустенита в поверхностном слое шлифованных деталей, что способствует повышению микротвердости и усталостной прочности. Доказано наличие прямой зависимости между остаточным аустенитом в поверхностном слое, основными показателями качества, эксплуатационными характеристиками шлифованных деталей и условиями их формообразования. Предложены технологические рекомендации по организации процесса шлифования цементированных заготовок, позволяющие подбирать эффективные условия и элементы режима обработки высокопористыми абразивными кругами, что обеспечивает большие значения микротвердости, минимальные значения по остаточным напряжениям и содержанию остаточного аустенита в поверхностном слое. При этом значения шероховатости и волнистости остаются в пределах требований рабочего чертежа детали. Опытно-промышленное внедрение результатов исследований в производственный процесс бесцентрового шлифования шеек шипов крестовины карданного вала на предприятии АО «Кардан» (г. Сызрань) позволило сократить трудоемкость механической обработки изделия на 17,5 %.

**Ключевые слова:** цементруемые стали, технологические остаточные напряжения, фазовый состав, шероховатость поверхности, микротвердость

**Для цитирования:** Федотов В.В., Киселев Е.С. Зависимость качества шлифованных поверхностей детали от содержания остаточного аустенита в поверхностном слое цементированной закаленной стали // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 4 (178). С. 20–28. doi: 10.30987/2223-4608-2026-3-20-28

## The dependence of condition of grinding finish parts on the content of residual austenite in the surface layer of casehardened steel

Victor V. Fedotov<sup>1</sup>, Engineer

Evgeny S. Kiselev<sup>2</sup>, D. Eng.

<sup>1</sup> Branch of Samara State Technical University, Syzran, Russia

<sup>2</sup> Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

<sup>1</sup> tms10@yandex.ru,

<sup>2</sup> kec.ulstu@mail.ru

**Abstract.** The paper examines the specific features of grinding workpieces made of hardened case-hardened steels. An increase in the relative content of retained austenite in the surface layer of case-hardened alloy steel enhances the ductility of the material and leads to a decrease in its hardness, which significantly degrades the fatigue strength and wear resistance of the machined surface. Considering that the majority of components of various machines and mechanisms operating under conditions of increased frictional interaction are made of case-hardened steels, research on this topic is relevant for various industries. The purpose of this study is to evaluate changes in the percentage of retained austenite in the machined surface after grinding under various processing conditions. The conducted research made it possible to establish a rational grinding mode that ensures a minimum content of retained austenite in the surface layer of ground parts, which contributes to increased microhardness and fatigue strength. A direct correlation between residual austenite in the surface layer, key quality indicators, and the performance characteristics of ground parts, as well as the shaping conditions, has been demonstrated. Technological recommendations for organizing the grinding process for case-hardened workpieces are proposed, enabling the selection of effective conditions and machining regime elements using highly porous abrasive wheels. This ensures high microhardness values, minimal residual stresses, and residual austenite content in the surface layer. Furthermore, roughness and waviness values remain within the specifications of the working drawing. Pilot-scale implementation of these research findings in the production process of centerless grinding of universal joint cross pin journals at JSC Kardan (Syzran) has reduced the labor intensity of machining the part by 17,5 %.

**Keywords:** casehardened steels, technological residual stresses, phase composition, surface roughness, microhardness

**For citation:** Fedotov V.V., Kiselev E.S. The dependence of condition of grinding finish parts on the content of residual austenite in the surface layer of casehardened steel / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 4 (178). P. 20–28. doi: 10.30987/2223-4608-2026-4-20-28

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы оптимизации технологии шлифования заготовок из различных материалов являются объектом исследований авторов многочисленных публикаций, как в Российской Федерации, так и в зарубежных странах. Установлено, что при шлифовании заготовок из закаленных цементированных сталей наблюдается существенно больший износ абразивного круга по сравнению с изготовлением деталей из высокоуглеродистых закаленных ТВЧ сталей той же твердости [1 – 3]. При снятии равных припусков со шлифованием закаленных ТВЧ высокоуглеродистых сталей это снижает производительность процесса, особенно при крупносерийном и массовом производстве.

Вероятно, причина заключается в различиях микроструктуры поверхностного слоя, обусловленных присутствием легирующих компонентов, таких как хром, молибден, никель и др., что усиливает тепловые нагрузки на АК и повышает физическую напряжённость операции шлифования.

Закалка заготовок из цементированной стали характеризуется активным превращением значительной доли аустенита, сосредоточенного в ПС, в структуру мартенсита. Под воздействием высоких температур и последующего быстрого охлаждения формируется прочный и твердый закаленный слой материала на поверхности заготовки.

Переход аустенита в мартенсит вызывает существенные изменения объема

кристаллической решётки, что непосредственно влияет на характеристики ПС закалённой заготовки, включая технологические остаточные напряжения и показатели микротвёрдости. Мартенситная структура обладает повышенной прочностью, что и затрудняет ее обработку со съемом припусков

Установлено, что при шлифовании цементированных закалённых сталей между зоной формирования новой обработанной поверхности и абразивным зерном мгновенно возникает высокая контактная температура, достигающая значений порядка 1000...1500 °С [1].

Металл, прошедший процедуру закалки, подвергается при последующем интенсивном абразивном воздействии эффекту «вторичной закалки на аустенит» [1]. В результате доля остаточного аустенита в поверхностном слое детали увеличивается до 40...60 %. Повышение содержания остаточного аустенита негативно сказывается на качестве обработанной поверхности, снижается её микротвёрдость и усталостная прочность [1]. Шлифование заготовок с высоким содержанием углерода и наличием легирующих элементов в цементированном слое отличается повышенной абразивной стойкостью шлифуемой поверхности, усложняющей процесс обработки и сопровождающейся появлением дефектов на обработанной поверхности детали. В то время как, по данным исследований С.А. Пахомовой и М.Ю. Рыжовой, пониженное содержание углерода в поверхностном слое, наоборот, способствует облегчению процесса шлифования и снижению риска появления термических прижогов. Оптимальное значение карбидной фазы в диффузионном слое составляет около 15 %, что минимизирует вероятность проявления эффектов микротекучести и усталостного трещинообразования [2].

Шлифование цементруемых сталей в пределах ПС сопряжено с проявлением абразивной износостойкости металла. Термином «абразивная износостойкость» принято обозначать способность материала противостоять удалению его микрочастиц с обрабатываемой

поверхности под действием нормальных сил резания [1 – 4], возникающих при взаимодействии заготовки с абразивным кругом. Данный процесс сопровождается частичным образованием стружки, а также пластической деформацией поверхностного цементированного слоя металла.

Авторами работы [5] подчеркивается, что механизм формирования износостойкости шлифуемого материала носит комплексный характер и зависит не только от силовых факторов, но и от особенностей внутренней структуры материала, а также его усталостных характеристик. Именно поэтому шлифование цементированных заготовок, в отличие от обработки нецементированных закалённых сталей, намного чаще приводит к возникновению дефектов на обработанной поверхности вследствие углеродного охрупчивания.

Малинов Л.С. совместно с коллегами [1, 3] при изучении структуры цементруемых сталей выделил эффект «самозакалки», заключающийся в трансформации большой доли метастабильного аустенита в мартенсит под влиянием деформирующего воздействия абразивных частиц, что приводит к увеличению абразивной износостойкости шлифованных поверхностей.

Анализ результатов сравнения шлифования цементированных и нецементированных сталей марок 40Х, 65Г и У8, позволяет сделать вывод, что абразивная износостойкость указанных сталей закономерно возрастает с повышением содержания углерода. Однако, после прохождения одинаковой операции термической обработки стойкость цементированных сталей к абразивному износу на 50 % выше, чем у нецементированных образцов с аналогичной твердостью [2].

Отмечая преимущества цементации, выражающиеся в повышении износостойкости сталей, авторы работы [2] в отличие от исследований [5] не отмечают сопутствующий рост хрупкости цементированных слоёв, приводящий к уменьшению ударной вязкости и общей прочности к трещинообразованию.

Формирование качественной структуры ПС цементированных деталей, сочетающейся с необходимыми механическими характеристиками, представляет собой на практике сложную производственную задачу. Ни одна из известных методик финишной обработки цементированных сталей не может считаться универсальной, поскольку конечные качественные ее характеристики (шероховатость, микротвёрдость, величина технологических остаточных напряжений, глубина упрочнённого слоя и пр.) зависят от многочисленных технологических факторов.

Высокие мгновенные температуры, возникающие в зоне контакта абразивного круга с поверхностью заготовки и достигающие значений 1000...1500 °С, приводят к обратному превращению мартенсита в остаточный аустенит в течение чрезвычайно короткого промежутка времени. Эти преобразования характерны именно для поверхностного цементированного слоя, испытывающего наиболее сильное тепловое воздействие.

Рост относительного содержания остаточного аустенита в ПС цементированной закалённой легированной стали способствует увеличению пластичных свойств материала и приводит к снижению его твердости, что существенно ухудшает функциональные эксплуатационные характеристики обработанной поверхности [6, 7].

Основным вопросом дальнейших исследований является выявление, достаточно ли времени кратковременного воздействия высоких температур будет для обеспечения необходимой скорости протекания фазовых изменений в зоне контакта «абразивный круг-материал», чтобы успевал произойти полный переход мартенсита в остаточный аустенит?

Результаты исследований [1, 3] свидетельствуют о том, что в процессе шлифования заготовок из цементированных сталей зона контакта абразивных зерен с формируемой поверхностью нагревается до критического уровня температуры – порядка 1500 °С. Отмечается [3], что после предварительной закалки

при температуре 900 °С, находящийся в поверхностном слое метастабильный остаточный аустенит, благодаря интенсивному воздействию абразивных частиц, сохраняет способность к быстрому переходу в стабильную фазу мартенсита деформации.

Необходимо отметить, что механизм структурных изменений, предложенный Малиновым Л.С., отличается от традиционного подхода, сформулированного Садовским В.Д. [8]. Согласно последнему, быстрый нагрев частиц мартенсита до высоких температур вызывает прямое превращение в остаточный аустенит, называемое «фазовым наклёпом». Вместе с тем Л.С. Малинов утверждает о существовании критической скорости охлаждения, определяющей условия без диффузионного превращения аустенита в мартенсит [3].

Изучением наличия аустенитно-мартенситного слоя в закалённом металле занимаются и иностранные учёные, чьи выводы представлены в работе [9]. Они детально рассматривают повторяющиеся фазовые превращения между мартенситом и аустенитом, используя термин «термическое циклирование» («thermalcycling») и ссылаясь на первые подобные исследования, выполненные Гранжем Р.А. [10,11] на материале среднеуглеродистой цементированной стали марки AISI8640.

Для низколегированных закалённых сталей отмечается другая закономерность: чем выше скорость нагрева до температуры 850 °С и меньше продолжительность периода аустенизации (формирования аустенитной структуры), тем ниже средний размер зёрен аустенитной матрицы, формирующей основу мартенситной структуры (не превышающий 5 мкм [9]).

Кроме того, отмечается, что накопление энергии упругой деформации в ходе превращения аустенита в мартенсит и способность системы к саморегулированию играют значительную роль в формировании многообразия разновидностей мартенситной структуры [9].

## Методы исследований и материалы

Цель данного исследования состоит в оценке изменений процентного содержания остаточного аустенита в поверхностном слое обработанной поверхности после выполнения шлифовальной операции с различными условиями обработки.

Исследуемые образцы были отобраны из шеек шипов крестовин карданных валов, изготовленных из цементируемой стали на предприятиях АО «Автокомпонент» (г. Ульяновск) и АО «Кардан» (г. Сызрань).

В технологических процессах рассматриваемых предприятий используются шлифовальные круги  $1 \times 600 \times 22 \times 305$  92A F150 O8 V5. По результатам лабораторных исследований в ходе опытно-промышленных испытаний было рекомендовано использование аналогичных кругов, отличавшиеся лишь номером структуры и с заменой элементов режима шлифования на более интенсивные с учетом ранее выполненных экспериментов.

В процессе лабораторных исследований и опытно-промышленных испытаний использовали шлифовальные круги трёх видов: с номерами структуры 8, 12 и 16. В технологическом процессе предприятий закаленные цементированные заготовки из стали 19ХГН (62-64HRC) подвергали шлифованию на специализированном двухкруговом бесцентрово-шлифовальном оборудовании фирмы «Giustina» модели 267. Рабочая скорость круга составляла  $v_k = 42,7$  и  $50$  м/с, скорость врезной подачи –  $v_s = 2$  мм/мин. В зону обработки поливом, с расходом 40 л/мин подавали поливом водный раствор СОЖ «Coolant» относящейся к классу биостабильных полусинтетических составов. Продолжительность выхаживания составляла  $\tau = 3$  с. Исходный диаметр заготовки до начала шлифования находился в диапазоне  $\varnothing 19,33 \pm 0,1$  мм, после шлифования – составил  $\varnothing 19,065_{-0,013}$  мм.

Для полноты оценки качественных характеристик обработанной поверхности и

оценки степени влияния условий обработки на результаты лабораторных исследований проводился многофакторный эксперимент с изменением следующих параметров режима резания: рабочая скорость круга  $v_k = 42,7$  и  $50$  м/с, скорость врезанной подачи  $v_s$  варьировалась между значениями 2,5 и 1,5 мм/мин, время выхаживания  $\tau$  устанавливалось равным 5 и 1 с. Величина снимаемого припуска оставалась постоянной и составляла 0,13 мм [12].

Правка инструмента проводилась с использованием специального фасонного алмазного ролика типа UK 2994.10, изготовленного акционерным обществом «ВНИИАЛМАЗ».

Среднее арифметическое отклонение профиля обработанной поверхности, а также величину волнистости на ней измеряли после шлифования напрофилометре модели 130.

Оценку фазового состояния металла поверхностного слоя опытных образцов осуществляли с использованием рентгенографического комплекса «Рикор-7», оснащённого медным катодом. Соотношение фаз рассчитывали по следующей зависимости:

$$K = \frac{I_{\max \gamma - \text{Fe}}}{I_{\max \lambda - \text{Fe}}}$$

где  $I_{\max \gamma - \text{Fe}}$ ,  $I_{\max \lambda - \text{Fe}}$  – интенсивности пиков, соответствующих аустениту ( $\gamma$ -железо) и мартенситу ( $\lambda$ -железо).

Технологические остаточные напряжения третьего рода определяли также рентгенографическим методом на приборе «Рикор-4», суть которого сводится к фиксации искажений размеров кристаллической решётки металла под воздействием внешних нагрузок. Возникновение технологических остаточных напряжений вызывается изменением длин сторон элементарной кристаллической ячейки, зависящих от направления действия упругих деформаций.

При попадании рентгеновских лучей на образец возникает интерференция отражённых от элементов кристаллической решётки лучей света.

Микротвёрдость поверхностного слоя испытуемых образцов определяли на микротвердомере Tukon 1102/12/02 производства компании Wilson Hardness.

### Результаты и обсуждение

Средние статистические результаты, полученные при проведении трёх серий параллельных экспериментов представлены в табл. 1 [13].

В табл. 2 представлены результаты измерений микротвёрдости шлифованных в промышленных условиях АО «Кардан» (г. Сызрань) цементированных образцов из стали 19ХГН (62-64 HRC) на косом шлифе по 6-ти точкам.

При увеличении скорости шлифования с 42,7 до 50 м/с, снижении времени выхаживания с 3 до 1 с и повышении номера структуры круга с 8 до 12 уменьшается количество активных абразивных зёрен, приходящихся на единицу площади обрабатываемой поверхности. Это сокращает продолжительность воздействия абразивных зёрен на обрабатываемый материал заготовки, а следовательно, снижают длительность теплового воздействия. Как следует из анализа исследований, представленных в работе [14], максимальное значение мгновенной температуры на участке контакта поверхностного слоя заготовки с режущей кромкой растёт с увеличением номера структуры круга.

## 1. Зависимость характеристик качества поверхностного слоя шеек крестовин карданного вала от элементов режима резания и структуры круга

### 1. The dependence of the qualitative properties of the surface layer of the U-joints on the elements of the cutting mode and the circle structure

№ опыта	Рабочая скорость круга $v_k$ , м/с	Скорость врезной подачи $v_s$ , мм/мин	Время выхаживания $\tau$ , с	Номер структуры круга $N_{стр}$	Содержание остаточного аустенита в поверхностном слое (%)	Остаточные напряжения III рода $\sigma_{III}$ , МПа	Шероховатость $Ra$ , мкм	Волнистость $W$ , мкм
1	50	1,5	1	8	13,06	11,87	0,79	0,57
2		2,5	5	8	13,89	16,57	0,73	0,52
3		1,5	5	8	13,47	15,62	0,87	0,66
4		2,5	1	8	12,66	10,76	0,81	0,595
5		1,5	1	12	12,8	15,4	0,92	0,58
6		2,5	5	12	11,9	10,69	0,8	0,64
7		1,5	5	12	12,45	14,32	0,95	0,75
8		2,5	1	12	11,23	9,51	0,78	0,62
9		1,5	1	16	13,94	12,75	0,98	0,75
10		2,5	5	16	15,24	17,72	0,84	0,633
11		1,5	5	16	14,63	16,97	1,06	0,865
12		2,5	1	16	13,56	12,13	0,93	0,7

Таким образом, указанные изменения технологии шлифования крестовин карданных валов препятствуют превращению мартенсита, сформировавшегося в поверхностном слое после закалки, обратно в аустенит. Поверхность

цементированной детали после обработки сохраняет большую твёрдость, что подтверждено соответствующими исследованиями, результаты которых представлены в табл. 2.

## 2. Микротвёрдость поверхностного слоя шеек шипов крестовин карданного вала при различных условиях шлифования

### 2. Microhardness of the surface layer of the neck spikes of the U-joints under various grinding conditions

Номер точки	Глубина определения микротвёрдости в поверхностном слое детали, мм	Микротвёрдость HV, МПа	
		$v_k = 50$ м/с; $v_S = 2,5$ мм/мин; $\tau = 1$ с; $N_{стр} = 12$ (предлагаемая технология)	$v_k = 42,7$ м/с; $v_S = 2$ мм/мин; $\tau = 3$ с; $N_{стр} = 8$ (технология АО «Кардан»)
1	0,22	7512	5805
2	0,44	7415	5143
3	0,66	6630	4583
4	0,88	6350	4588
5	1,1	6430	4641

Высокий процент остаточного аустенита в поверхностном слое цементированной заготовки, который не успел полностью перейти в мартенситную фазу в процессе закалки, либо образовался вновь при обратной трансформации из мартенсита в ходе шлифования, приводит к снижению качества обработанной поверхности детали по критерию микротвёрдость и ухудшает условия шлифования из-за повышения износостойкости поверхностного слоя заготовки. Причина этого кроется в повышенной пластичности аустенитной структуры цементированной легированной стали [6, 9].

Усиливающееся засаливание шлифовального круга при обработке приводит к необходимости проводить правку абразивного инструмента после каждой шестой обработанной детали. Исходя из этого, актуальной становится задача достижения

минимального содержания остаточного аустенита в поверхностном слое закалённой цементированной стали крестовин карданных валов.

Выполненные исследования дали возможность установить рациональный режим обработки, обеспечивающий минимальное содержание остаточного аустенита в поверхностном слое – 11,23 %.

При шлифовании по рекомендованному режиму (скорость вращения круга  $v_k = 50$  м/с, скорость подачи врезанием  $v_S = 2,5$  мм/мин, время выхаживания  $\tau = 1$  с, структура круга  $N_{стр} = 12$ ) наблюдаются минимальные величины остаточного аустенита, ТОН III рода, а также значения геометрических параметров качества: шероховатости и волнистости. Использование указанного режима гарантирует достижение более высоких

значений микротвёрдости по сравнению с существующей по заводской технологии.

С использованием результатов выполненных исследований разработаны технологические рекомендации по выбору рационального режима обработки и характеристики высокопористых шлифовальных кругов для выполнения операций эффективного бесцентрового шлифования шеек шипов крестовин на предприятии АО «Кардан» (г. Сызрань). Определена рентабельность и рассчитано ожидаемый экономический эффект от внедрения инновационной технологии шлифования в крупносерийном производстве крестовин. Зафиксировано сокращение основного машинного времени на операцию шлифования ( $t_m$ ), в 2,8 с, из которых две секунды приходится на этап финишной доводки выхаживанием.

### Заключение

1. Результаты выполненных исследований позволили установить взаимосвязь остаточного аустенита в поверхностном слое цементированной закаленной стали с параметрами качества и эксплуатационными характеристиками шлифованных поверхностей детали.

2. Величина остаточного аустенита в ПС обработанной детали из цементированных сталей зависит от основных технологических факторов процесса и условий ее изготовления: рабочей скорости шлифовального круга, скорости врезания, времени выхаживания и структуры шлифовального круга.

3. Наименьшие показатели остаточного аустенита в структуре поверхностного слоя обработанной детали, ТОН III рода, шероховатости и волнистости зафиксированы в условиях эксперимента и подтверждены при опытно-промышленными испытаниями при следующих элементах режима шлифования: скорость круга  $v_k = 50$  м/с, скорость подачи врезанием  $v_S = 2,5$  мм/мин, время выхаживания  $\tau = 1$  с, структура круга  $N_{стр} - 12$ .

4. Выбор данного режима обработки способствует достижению большей микротвёрдости ПС и усталостной прочности по сравнению с показателями, получаемыми при существующем заводском варианте шлифования.

5. Выполненные исследования показали наличие взаимосвязи между качеством, эксплуатационными характеристиками шлифованных деталей и условиями их формообразования. 6. Опытное-промышленное внедрение результатов исследований на предприятии АО «Кардан» (г. Сызрань) позволило сократить трудоемкость шлифования крестовин на 17,5 %.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Малинов Л.С.** Абразивная и ударно-абразивная износостойкость цементруемых сталей с повышенным содержанием углерода после термообработки // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2000. № 9. С. 92–94.

2. **Пахомова С.А.** Контактная выносливость и износостойкость теплостойкой стали после разных видов цементации // Вестник научно-технического развития. 2016. № 9 (109). С. 19–28.

3. **Малинов Л.С.** Универсальность принципа получения в структуре сталей и чугунов метастабильного аустенита для повышения их абразивной износостойкости // Трение и износ. 2022. Т. 43. № 3. С. 282–291.

4. **Островский В.И.** Теоретические основы процесса шлифования Л.: Изд-во ЛГУ. 1981. 144 с.

5. **Гадалов В.Н.** Абразивная износостойкость металлических материалов с цементитосодержащими структурами // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. № 4. С. 45–49.

6. **Маслов Е.Н.** Основы шлифования материалов. М.: Машиностроение. 1974. 320 с.

7. **Садовский В.Д.** Структурная наследственность в стали. Серия «Успехи современного металловедения». М.: Металлургия. 1973. С. 208.

8. **Гуляев А.П.** Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

9. **Furuhara T., Kikumoto K., Saito H., Sekine T., Ogawa T., Morito S., Maki T.** Phase Transformation from Fine-grained Austenite. ISIJ International. Vol. 48 (2008). No. 8. Pp. 1038–1045.

10. **Grange R.A.** Method of producing ultrafine grained steel. ASM Trans. Vol. 59. pp. 26–48.

11. **Grange R.A.** Effect of Microstructural Banding in Steel. Metall. Mater. Trans. Vol. 2. No. 65. pp. 417–426

12. **Справочник** технолога / под общ.ред. А.Г.Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

13. **Федотов В.В.** К оценке взаимосвязи условий шлифования цементируемых заготовок с параметрами качества поверхностного слоя // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2023. № 4 (83). С. 57–64.

14. **Абразивная** и алмазная обработка материалов / под общей ред. А. Н. Резникова. М.: Машиностроение. 1977. 392 с.

## REFERENCES

1. Malinov L.S. Abrasive and impact-abrasive wear resistance of casehardened steels with increased carbon content after heat treatment // Bulletin of the Azov State Technical University. 2000. Issue 9. pp. 92–94.

2. Pakhomova S.A. Contact endurance and wear resistance of heat-resistant steel after various types of casehardening // Bulletin of Scientific and Technical development. 2016. No. 9 (109). pp. 19–28.

3. Malinov L.S. Universality of the principle of obtaining metastable austenite in the structure of steels and cast irons to increase their abrasive wear resistance // Friction and wear. 2022. Vol. 43. No. 3. pp. 282–291.

4. Ostrovsky V.I. Theoretical foundations of the grinding process Leningrad: Publishing House of Leningrad State University. 1981. 144 p.

5. Gadalov V.N. Abrasive wear resistance of metallic materials with casehardening structures // Bulletin of the

Moscow State Technical University named after G.I. Nosov. 2011. No. 4. pp. 45–49.

6. Maslov E.N. Fundamentals of grinding materials. Moscow: Mashinostroenie. 1974. 320 p.

7. Sadovsky V.D. Structural heredity in steel. The series «Successes of modern metal science». Moscow: Metallurgiya. 1973, 208 p.

8. Gulyaev A.P. Science of metals. Textbook for universities. 6-th ed., updated and revised. Moscow: Metallurgy, 1986. 544 p.

9. Furuha T., Kikumoto K., Saito H., Sekine T., Ogawa T., Morito S., Maki T. Phase Transformation from Fine-grained Austenite. ISIJ International. Vol. 48 (2008). No. 8. Pp. 1038–1045.

10. Grange R.A. Method of producing ultrafine grained steel. ASM Trans. Vol. 59, pp. 26–48.

11. Grange R.A. Effect of Microstructural Banding in Steel. Metall. Mater. Trans. Vol. 2, No. 65. pp. 417–426

12. Technologist's Handbook / under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Innovative Engineering, 2019. 800 p.

13. Fedotov V.V. In the direction of the relationship estimate for the grinding conditions of casehardened workpieces and the quality parameters of the surface layer // Progressive technologies and systems of mechanical engineering. 2023. No. 4 (83). pp. 57–64.

14. Abrasive and diamond material processing // under the general editorship of A.N. Reznikov. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 392 p.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.01.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2026; принята к публикации 28.02.2026.

The article was submitted 29.01.2025; approved after reviewing 10.02.2026; assepted for publication 28.02.2026.