

УДК 536:621.9

¹В. В. Федотов, ²А. Ю. Полубанов, проф., д.т.н. ³Е. С. Киселёв, проф., д.т.н.,
³А. Н. Унянин

¹Филиал ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Сызрань, ²АО «Кардан», г. Сызрань,

³ФГБОУ ВО «УлГТУ», г. Ульяновск, Россия

Тел. / Факс: +7 (927)028-00-10, e-mail: tms10@yandex.ru

К ОЦЕНКЕ ВЗАИМОСВЯЗИ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ ЦЕМЕНТИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК С ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований параметров качества поверхностного слоя шеек шипов крестовины карданного вала в зависимости от параметров режима процесса шлифования и структуры шлифовального круга. Оценивали формирование параметров шероховатости, волнистости, структурно-фазового состава и остаточных напряжений шлифованной поверхности. Структурно-фазовый состав и остаточные напряжения измеряли с использованием аппаратуры рентгеновского типа. Полученные результаты позволили определить условия и режим обработки заготовок, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя, а также дать рекомендации по совершенствованию технологии проведения операции шлифования шеек крестовин карданных валов в условиях АО «Кардан (г. Сызрань).

Ключевые слова: шероховатость, волнистость, структурно-фазовый состав, остаточные напряжения, микротвердость, поверхностный слой, шейки крестовины карданного вала.

Fedotov V. V., Polubanov A. Yu., Kiselev E. S., Unyanin A. N.

THE CEMENTED WORKPIECES GRINDING CONDITIONS AND THE SURFACE LAYER QUALITY PARAMETERS RELATIONSHIP ASSESSMENT

The experimental studies results of the cardan shaft crosspiece journal spikes surface quality parameters depending on the grinding process mode parameters and the grinding wheel structure are presented. The roughness parameters, undulation, structural-phase composition and residual stresses of the polished surface formation was evaluated. The structural-phase composition and residual stresses were measured using X-ray type equipment. The results obtained made it possible to determine the workpieces conditions and processing mode ensuring the surface layer required quality, as well as to make recommendations for technology improvement of the cardan shaft crosspieces journal grinding at the JSC "Cardan (Syzran).

Keywords: roughness, undulation, structural-phase composition, residual stresses, microhardness, surface layer, cardan shaft crosspieces journals.

Проектирование и производство современной техники сопряжено со все более возрастающей долей деталей, изготавливаемых из материалов с уникальными физико-механическими свойствами из высокопрочных, коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сталей, титановых, алюминиевых и никелевых сплавов.

Разработка технологических процессов изготовления деталей из вышеуказанных материалов связана с необходимостью обеспечения повышенных требований к эксплуатационным характеристикам изделий, а, следовательно, к их геометрическим параметрам и физико-механическим свойствам поверхностных слоёв.

В настоящее время существует достаточно большое количество исследований, свидетельствующих о том, что важнейшее влияние на эксплуатационные свойства деталей (усталостная прочность, коррозионная стойкость, износостойкость и т.д.) оказывает состояние поверхностного слоя детали. Значение данного влияния в большой степени проявляется в автомобилестроении при производстве и эксплуатации нагруженных узлов и механизмов, в частности, деталей шарнира карданного вала.

Эксплуатационные свойства поверхностного слоя крестовины кардана определяют срок службы данного узла, величину нагрузки и крутящего момента, передаваемого через вал на задний мост автомобиля, а также возможность выдерживать ударные воздействия и сопротивляться негативным факторам агрессивной окружающей среды.

Наиболее важными параметрами качества поверхностного слоя, влияющими на эксплуатационные свойства ответственных деталей машин, являются именно физико-механические характеристики материала. При этом многие операции технологического процесса изготовления деталей, в том числе и операции шлифования, сопровождаются значительным теплообразованием, что является причиной возникновения структурно-фазовых преобразований и формирования в поверхностном слое заготовки неблагоприятных остаточных напряжений.

Целью данного исследования является повышение качества поверхностного слоя деталей автомобилей из цементированных сталей за счет выбора рациональных условий и режима шлифовальной операции.



Рисунок 1. Конструкция рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7»
1 – гониометрический узел; 2 – рентгеновская трубка; 3 – компьютер; 4 – детектор;
5 – вычислительный блок; 6 – исследуемая деталь

Для оценки качества поверхностного слоя цементированных деталей автомобилей использовали перечисленные ниже параметры:

1. Шероховатость шлифованной поверхности, оцениваемая следующими характеристиками [1].

- высота неровностей профиля по десяти точкам Rz , мкм;
- среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм;
- наибольшая высота неровностей профиля $Rmax$, мкм.

2. Волнистость поверхности.

Среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности Ra , а также другие параметры шероховатости и волнистости, измеряли на профилометре мод. 130.

3. Микротвердость определялась в соответствии с ГОСТ 9450-76 по следующей зависимости:

$$HV = F/S, (1)$$

где F – действующая на индентор твердомера нагрузка, Н; S – площадь поверхности отпечатка индентора в материале исследуемого образца, мм².

Определение микротвердости шлифованной поверхности осуществляли с использованием микротвердомера Tukon 1102/12/02 фирмы Wilson Hardness.

4. Фазовый состав поверхностного слоя шлифованной детали

Фазовое состояние металла поверхностного слоя (ПС) обработанных образцов исследовали с помощью рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7» с использованием медного катода (Рис. 1).

После установки подготовленного к измерениям образца выставляли наклон рентгеновской трубки в зависимости от материала исследуемой заготовки (ниже приведен пример для γ - и α -железа).

Соотношение α -железа и γ -железа в объеме поверхностного слоя (ПС) выполняли при настройке трубки медного катода на угол дифракции $2 \cdot \Theta \approx 44^\circ$. Это позволяло достичь максимальной интенсивности пиков феррита (α -железо, плоскость {110}, $2 \cdot \Theta \approx 44,5^\circ$) и аустенита (γ -железо, плоскость {111}, $2 \cdot \Theta \approx 43,5^\circ$), что дало возможность использовать величины интенсивностей их пиков для расчета соотношения объемов этих фаз.

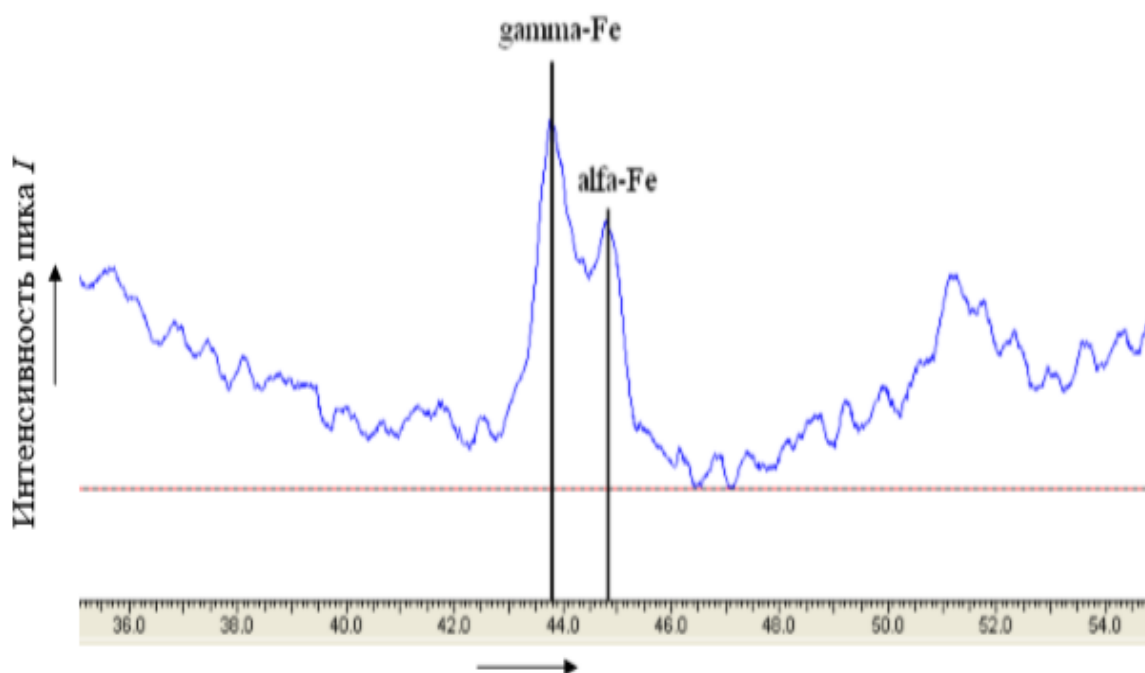


Рисунок 2. Показания рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7»

Значения параметров с детектора передавались на персональный компьютер и обчислялись программой MD-10, поставленной вместе с измерительным комплексом «Рикор-7» его разработчиками. После этого определялась экспозиция значений стандартного угла дифракции $2 \cdot \Theta$ по горизонтальной оси и интенсивности пиков I в вертикальной плоскости. Для лучшего отображения выбирали сглаживание спектра по

5 точкам. Пример показаний при исследовании фазового состава двухфазной стали на дифрактометре «Рикор-7» представлен на рис. 2.

Количественное соотношение фаз определили по формуле:

$$K = \frac{I_{\max \gamma\text{-Fe}}}{I_{\max \alpha\text{-Fe}}}, \quad (2)$$

где $I_{\max \gamma\text{-Fe}}$, $I_{\max \alpha\text{-Fe}}$ – интенсивности пиков, соответствующих аустениту (γ -железо) и ферриту (α -железо).

1. Технологические остаточные напряжения (ТОН) третьего рода оценивали рентгенографическим методом при помощи рентгеновского измерительного комплекса «РИКОР-4». При возникновении в исследуемом образце механических напряжений длина ребер элементарного куба меняется с ориентировкой ребра соответственно с упругими деформациями материала. При падении рентгеновских лучей на образец наблюдается интерференция лучей, рассеиваемых в кристаллической решетке металла.

Этот метод является «прямым» неразрушающим методом контроля остаточных напряжений, принципиальная схема которого представлена на рисунке 3. Данный метод основан на оценке величины деформации кристаллической решетки материала.

При выборе абразивного инструмента для исследования ориентировались на применяемый в действующем производстве автомобильной промышленности в процессе шлифования шлифования заготовок из цементированных сталей, в частности, в условиях АО «Автокомпонент» (г. Ульяновск) и АО «Кардан» (г. Сызрань). Использовали круги 92А F150 O 8 V5, варьируя номером структуры: 8, 12 и 16 [6].

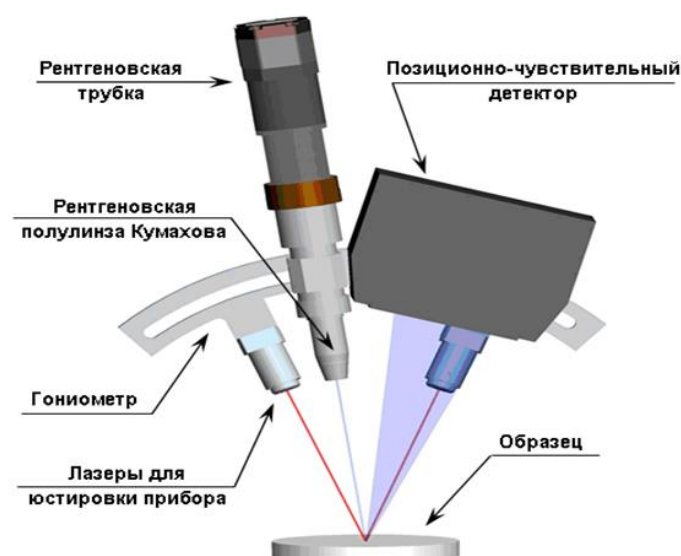


Рисунок 3. Принципиальная схема устройства рентгеновского измерительного комплекса «РИКОР-4»

В качестве образцов для экспериментов на операции бесцентрового шлифования использовали крестовины карданных валов из стали 19ХГН, изготавливаемые на АО «Кардан» (г. Сызрань), после токарной и термической обработки (цементация на глубину 0,8 ... 1,1 мм с последующей закалкой до твердости HRC 58...62).

В процессе шлифования использовалась универсальная биостабильная 2-3%-ная полусинтетическая смазочно-охлаждающая жидкость «Coolant».

При проведении многофакторного эксперимента для оценки качественных характеристик поверхностного слоя шлифованных поверхностей использовали следующие элементы режима [7]: рабочая скорость круга $V_k = 50$ м/с; скорость врезной подачи $V_S = 2,5$ и $1,5$ мм/мин; время выхаживания $\tau = 5$ и 1 с. Снимаемый припуск – $0,13$ мм.

Состав и количество опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1. – Состав опытов

№ серии опытов	Скорость врезной подачи V_S , мм/мин	Время выхаживания τ , с	Номер структуры круга $N_{стр}$	Выходные параметры
1	2,5	5	8	Структурно-фазовый состав (С); остаточные напряжения 3-го рода (ТЗ); параметр Ra шероховатости; средняя высота волн W
2	1,5	5	8	
3	2,5	1	8	
4	1,5	1	8	
5	2,5	5	16	
6	1,5	5	16	
7	2,5	1	16	
8	1,5	1	16	

Обработку и анализ результатов полного многофакторного эксперимента типа ПФЭ 2^3 (этапы исследований № 2 и 3) производили в соответствии с РДМУ 109-77 [8,9].

В табл. 2 представлены средние значения выходных параметров, полученные в трех параллельных экспериментах.

Таблица 2. – Средние значения параметров, полученных в параллельных экспериментах

№ серии опытов	Содержание цементита в поверхностном слое С (%)	Остаточные напряжения III рода ТЗ, МПа	Параметр шероховатости Ra , мкм	Средняя высота волн W , мкм
1	13,89	169	0,79	0,57
2	13,06	121	0,73	0,52
3	13,47	159,3	0,87	0,66
4	12,66	109,7	0,81	0,595
5	15,24	180,7	0,98	0,75
6	13,94	130	0,84	0,633
7	14,63	173	1,06	0,865
8	13,56	123,7	0,93	0,7

Минимальные значения остаточных напряжений 3-го рода, полученные при скорости подачи $V_S = 1,5$ мм/мин и времени выхаживания $\tau = 1$ с, составляют $109,7$ МПа при шлифовании кругом 8-й структуры и $123,7$ МПа при шлифовании кругом 16-й структуры. Максимальные значения остаточных напряжений 3-го рода зафиксированы при $V_S = 2,5$ мм/мин и $\tau = 5$ с и составляют 169 и $180,7$ МПа при шлифовании кругом 8-й и 16-й структуры соответственно. Это можно объяснить более высокой температурой поверхностного слоя заготовки и большим периодом действия теплового источника при больших значениях V_S и τ .

При шлифовании кругом 16-й структуры ТОН 3-го рода в среднем на 9% выше, чем при шлифовании кругом 8-й структуры. Это связано с меньшим количеством абразивных зерен на рабочей поверхности круга 16-й структуры. В работе А.Н. Резникова [10] приводится зависимость для расчёта числа работающих зерен:

$$n_p \approx 0,167 \cdot \frac{\beta^*}{\alpha^{3/4} \sqrt{\text{tg} \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{K}}{x^2 \sqrt{1-\varepsilon}} \cdot \sqrt{\frac{\omega}{1000 \cdot V_k}}, \quad (3)$$

где α – коэффициент формы зерна; β^* – поправочный коэффициент на несимметричное расположение кривой расположения вылетов вершинок зерен в рабочем слое круга; γ – половина средне-вероятного значения угла режущих вершинок зерна; x – среднее значение размера зерна; K – концентрация абразивного материала; ε – относительная критическая глубина заделки зерен; ω – удельная производительность; V_k – скорость круга.

Коэффициент K зависит от структуры круга.

Известно, что при увеличении номера структуры круга уменьшается концентрация зерен. Например, объемное содержание зерен в рабочем слое круга стандартной характеристики со структурой 7 составляет 48 %. В высокопористых кругах со структурой 12 абразив занимает 38 % объема рабочего слоя, а для структуры 16 количество абразивного материала снижается до 30% [11].

С уменьшением количества зерен увеличиваются глубина внедрения их в заготовку, силовые нагрузки, воздействующие на них в процессе обработки, а, соответственно, и локальные температуры. Эти выводы подтверждаются данными Е.П. Калинина [12], который определял максимальную толщину (мм) недеформированной стружки, снимаемой одним зерном, по математической зависимости:

$$a_{z_{\max}} = 2,75 \cdot 10^{-2} \frac{V_3 \left(\frac{d_k \pm D_k}{d_k \cdot D_k} \right)^{0,5}}{V_k} \cdot \frac{t_{\phi}^{0,5} \cdot N}{(31-C)^{0,25} \cdot K_3^{0,75}}, \quad (4)$$

где N – номер зернистости круга по ГОСТ 3647-80; C - номер структуры; K_3 – объемная доля зерна в круге.

Параметр Ra шероховатости и средняя высота волн W шлифованной поверхности снижаются с уменьшением V_S и увеличиваются с уменьшением значения времени выхаживания τ . При шлифовании кругом 16-й структуры значения параметров Ra и W на 19 и 25% выше, чем при шлифовании кругом 8-й структуры, что может быть связано с большим значением глубин внедрения зерен круга 16-й структуры в заготовку.

При шлифовании кругом 12-й структуры получены следующие результаты: $C = 14,56\%$; $T_3 = 173,9$ МПа; $Ra = 0,82$ мкм; $W = 0,602$ мкм. Эти результаты, как и следовало ожидать, занимают промежуточные значения между полученными при шлифовании кругами 8-й и 16-й структуры.

Ниже представлены уравнения регрессии, полученные после обработки результатов полного многофакторного эксперимента.

$$\begin{aligned} C &= 11,36 + 0,8 \cdot V_S + 0,06 \cdot N_{cmp}; \\ T_3 &= 22,33 + 53,83 \cdot V_S + 5,33 \cdot \tau + 3,28 \cdot N_{cmp}; \\ Ra &= 0,74 + 0,063 \cdot V_S - 0,02 \cdot \tau + 0,0049 \cdot N_{cmp}; \\ W &= 0,51 + 0,069 \cdot V_S - 0,014 \cdot \tau. \end{aligned}$$

В уравнении для расчета параметра C значимыми являются два коэффициента – при параметрах V_S и N_{cmp} . Оба этих коэффициента являются положительными, следовательно, с увеличением скорости подачи и номера структуры количество

остаточного цементита увеличивается. Коэффициент при параметре τ является незначимым, что свидетельствует о незначительном влиянии времени выхаживания на содержание остаточного цементита.

В уравнении для расчета остаточных напряжений 3-го рода значимыми оказались коэффициенты перед каждым из параметров – V_S , τ , N_{cmp} . Все эти коэффициенты положительны. Следовательно, с увеличением V_S , τ и N_{cmp} значения остаточных напряжений увеличиваются.

В уравнении для расчета среднего арифметического отклонения профиля Ra положительное значение имеют коэффициенты при параметрах V_S и N_{cmp} , поэтому при увеличении величин этих параметров значение Ra увеличивается. Коэффициент регрессии при параметре τ имеет знак минус, что свидетельствует об уменьшении значения Ra с увеличением времени выхаживания.

Уравнение регрессии для расчета параметра волнистости W содержит лишь два значимых коэффициента, причем коэффициент при параметре V_S является положительным, а при параметре τ – отрицательным.

При взаимодействующих факторах во всех уравнениях не оказался значимым ни один коэффициент регрессии.

Минимальные значения количества остаточного цементита, остаточных напряжений 3-го рода, шероховатости и волнистости получены на режиме: рабочая скорость шлифовального круга $V = 50$ м/с; скорость врезной подачи $V_S = 1,5$ мм/мин; время выхаживания $\tau = 5$ с; номер структуры круга $N_{cmp} = 8$.

Результаты измерения микротвердости заготовок, проточенных на вышеприведенном режиме и по технологии, действующей на АО «Кардан» (г. Сызрань) ($V_k = 42,7$ м/с, $V_S = 2$ мм/мин, $\tau = 3$ с, номер структуры круга $N_{cmp} = 8$), приведены в таблице 3.

С увеличением расстояния от наружной цилиндрической поверхности заготовки значения микротвердости уменьшаются. Микротвердость на расстоянии 0,22 мм выше, чем на расстоянии 1,1 мм, на 17 ... 25%. На расстоянии 0,66 ... 1,1 мм от наружной цилиндрической поверхности значения микротвердости практически не меняются.

Таблица 3. Средние значения результатов измерения микротвердости по HV , полученные в параллельных экспериментах

Номер точки	Расстояние от наружной цилиндрической поверхности заготовки, мм	Условия проведения эксперимента	
		$V = 50$ м/с; $V_S = 1,5$ мм/мин; $\tau = 5$ с; $N_{cmp} = 8$	$V = 42,7$ м/с; $V_S = 2$ мм/мин; $\tau = 3$ с; $N_{cmp} = 8$ (технология АО «Кардан»)
1	0,22	751,2	580,5
2	0,44	741,5	514,3
3	0,66	663	458,3
4	0,88	635	458,8
5	1,1	643	464,1

Шлифование на режиме, обеспечивающем лучшие результаты ($V = 50$ м/с; $V_S = 1,5$ мм/мин; $\tau = 5$ с), обеспечивает большие значения микротвердости, чем шлифование на режиме по заводской технологии. В точках № 1 и 2 микротвердость выше на 30 и 44% соответственно; в точках 3, 4 и 5 – выше в среднем на 40%. Это можно объяснить меньшей скоростью врезной подачи и меньшей температурой в зоне шлифования.

Полученные результаты позволяют определить условия и режим обработки заготовок деталей, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя.

Минимальные значения количества остаточного цементита, остаточных напряжений 3-го рода, шероховатости и волнистости получены на режиме: скорость врезной подачи $V_S = 1,5$ мм/мин; время выхаживания $\tau = 5$ с; номер структуры круга $N_{стр} = 8$.

Шлифование на этом режиме обеспечивает большие значения микротвердости, чем шлифование по заводской технологии.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ Р 70117-2022. Шероховатость поверхности. Рекомендации по выбору: национальный стандарт РФ. Введ. 2023-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Москва: Стандартинформ, 2022. – 18 с.
2. Ефименко, Л. А. Металловедение и термическая обработка сварных соединений: учебн. пособие. / Ефименко Л. А., Прыгаев А. К., Елагина О. Ю. – М.: Логос, 2007. – 456 с.
3. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры: межгосударственный стандарт. Введ. 1957-07-01 / Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 12 с.
4. Кроха, В. А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. – М: Машиностроение, 1968. – 131 с.
5. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу. Ч. 1. Метод измерения: национальный стандарт РФ. Введ. 2008-08-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.
6. Боровский, Г. В. Справочник инструментальщика / Г. В. Боровский, С. Н. Григорьев, А. Р. Маслов; ред. А. Р. Маслов. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2007. – 463 с.: ил.
7. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания. Ч. II. Нормативы режимов резания. – М.: Экономика, 1999. – 474 с.
8. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
9. РДМУ 109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов: методические указания. – М.: Изд. стандартов, 1978. – 64 с.
10. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под. ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
11. Старков, В. К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2007. – 600 с.
12. Калинин, Е. П. Научные основы интенсивного бесприжогового шлифования сталей и сплавов с учетом степени затупления инструмента: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Е. П. Калинин; Санкт-Петербургский гос. техн. ун-т. – Санкт-Петербург: 1995. – 246 с.

Поступила в редколлегию 19.03.2023 г.