

УДК 621.787, 620.179.18, 621.7.07, 621.789

Влияние малопластичного выглаживания на твердость, шероховатость и остаточные напряжения образцов из никелевого сплава

А.А. Ширяев¹, В.В. Карманов², М.А. Мордвин²¹ АО «ОДК-Авиадвигатель»² ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Effect of low-plasticity burnishing on hardness, roughness and residual stresses of nickel alloy samples

A.A. Shiryaev¹, V.V. Karmanov², M.A. Mordvin²¹ UEC-Aviadvigatel JSC² Perm National Research Polytechnic University

Рассмотрено влияние параметров малопластичного выглаживания (угла наклона и шага инструмента) на шероховатость, твердость и остаточные напряжения в образцах из никелевого сплава. Одна сторона образца предварительно фрезеровалась, другая — оставалась исходной после электроэрозионной обработки. Малопластичное выглаживание использовалось в качестве финишной обработки. Результаты исследования показали, что максимальный угол наклона инструмента для обработки сложнопрофильных поверхностей больше либо равен 60° . Это обеспечивает шероховатость 0,3 мкм и уровень остаточных напряжений сжатия в диапазоне $-0,48...-0,36$ отн. ед., что сопоставимо с параметрами поверхностного слоя при обработке по нормали (90°). Варьирование шага инструмента показало, что при шаге 3 мм обеспечивается наименьшая шероховатость, наибольшая твердость (50 HRC) и высокие остаточные напряжения сжатия. Использование малопластичного выглаживания приводит к выравниванию значений остаточных напряжений в двух направлениях (вдоль и поперек направления обработки). Шероховатость уменьшается в 2 раза (до 0,208 мкм) вне зависимости от вида обработанной поверхности.

EDN: HEРВОF, <https://elibrary/hepbof>

Ключевые слова: твердость поверхности, малопластичное выглаживание, упрочнение поверхностного слоя, шероховатость поверхности, остаточные напряжения, угол наклона

The article considers the influence of low-plasticity burnishing parameters (tilt angle, tool pitch) on roughness, hardness and residual stresses in nickel alloy samples. One side of the sample was pre-milled, the other was left original after electrical discharge machining. Low-plasticity burnishing was supposed to be used as a finishing treatment. The results of the study showed that the maximum tool tilt angle for machining complex-profile surfaces is $\geq 60^\circ$. This ensures a roughness of 0.3 μm ; the value of compressive residual stresses in the range of $-0.48...-0.36$ rel. units, which is comparable with the parameters of the surface layer during normal machining (90°). Varying the tool pitch showed that a pitch of 3 mm ensures the lowest roughness, the highest hardness (50 HRC) and high compressive residual stresses. The use of low-plasticity smoothing results in the equalization of residual stress values in 2 directions (along and across the treatment). Roughness is improved by 2 times (up to 0.208 μm) regardless of the type of treated surface.

EDN: HEPBOF, <https://elibrary/hepbof>

Keywords: surface hardness, low-plastic burnishing, surface layer strengthening, surface roughness, residual stresses, angle of inclination

Технологическим методам упрочнения поверхностного слоя (ПС) отводится определенная роль в обеспечении высокого ресурса деталей и конструкций.

Для получения требуемых физико-механических свойств материала в различных отраслях промышленности применяются как традиционные методы — термическая обработка [1], диффузионное насыщение ПС другими элементами [2], закалка токами высокой частоты, поверхностное пластическое деформирование [3–5], наплавка, — так и методы на основе воздействия на ПС различными видами излучений (лазерное, магнитное, нейтронное) [6].

Поверхностное пластическое деформирование относится к способам увеличения усталостной долговечности лопаток компрессора. Среди упрочняющих обработок наибольшее распространение получили дробеструйная, гидродробеструйная и ультразвуковая, в меньшей степени — малопластичное выглаживание (МПВ).

Процесс МПВ (Low Plastic Burnishing — LPB) — вдавливание индентора (металлического/керамического шарика) в обрабатываемую поверхность (рис. 1). Диаметр применяемых шариков варьируется в диапазоне 2...18 мм в зависимости от геометрических параметров детали. Также применяют инструмент (шарики/ролики) одновременной двусторонней обработки для тонкостенных деталей типа лопаток. Шероховатость обрабатываемого слоя в результате накатывания снижается в 1,5–3 раза [7, 8]. Оборудование для МПВ позволяет устанавливать его в барабан для инструмента станков с числовым программным управлением.

В работе [9] показано изменение микротвердости и микрошероховатости в зависимости от усилия накатывания, шага обработки и схемы накатывания. Микротвердость увеличивается на 25...33 %, а микрошероховатость уменьшается в 2 раза и более.

Основными контролируемыми параметрами после упрочнения являются шероховатость и

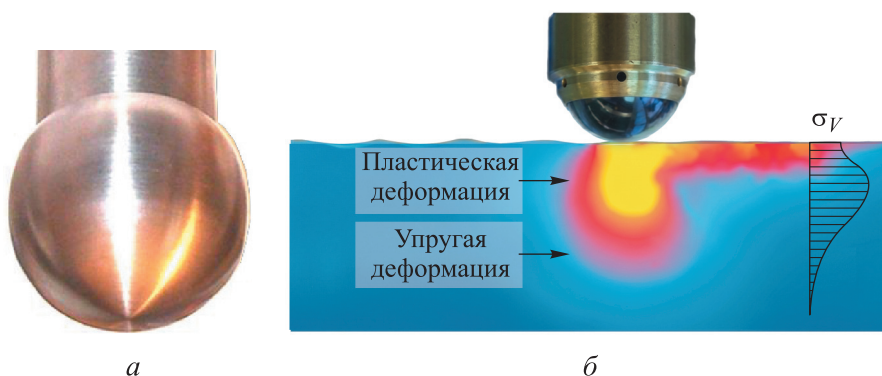


Рис. 1. Внешний вид индентора (а) и модель процесса МПВ (б)

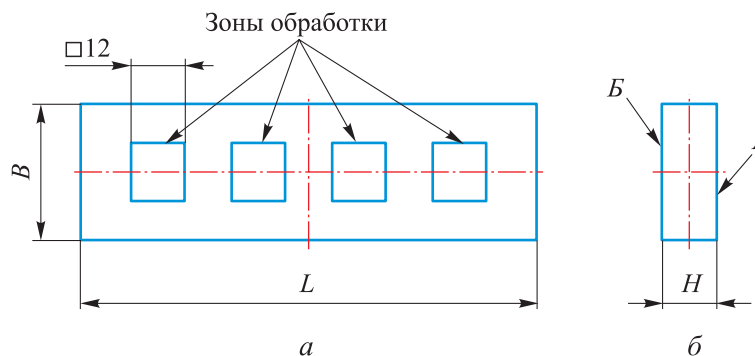


Рис. 2. Эскиз образца с исходным состоянием поверхности:
а — чистовое фрезерование; б — без обработки



Рис. 3. Внешний вид станочной оснастки для МПВ

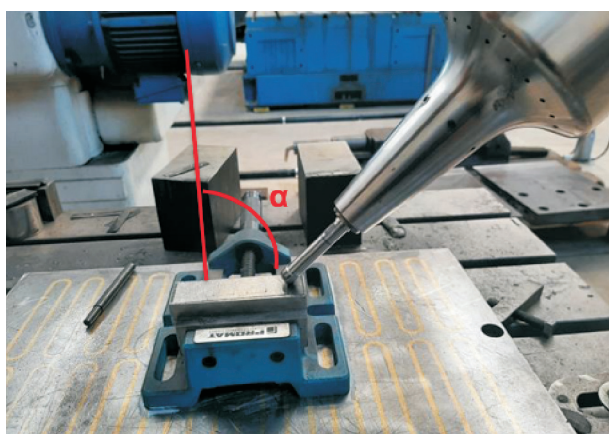


Рис. 4. Фрагмент закрепления образца и процесса обработки

микротвердость [7, 10], а также остаточные напряжения (ОН) и микроструктура [11, 12].

Применение МПВ позволяет увеличить твердость материала на 22...46 % в зависимости от сплавов [13]: в меньшей степени для титановых сплавов, в большей для никелевых сплавов и сталей.

Также предварительное использование МПВ перед операцией диффузионного насыщения позволило увеличить глубину диффузионной зоны [14].

Исследовательские работы по применению смазывающего охлаждения жидким азотом [14] при обработке сплава Ti-6Al-4V показали незначительное улучшение шероховатости поверхности (0,35 мкм) по сравнению с исходной (0,32 мкм).

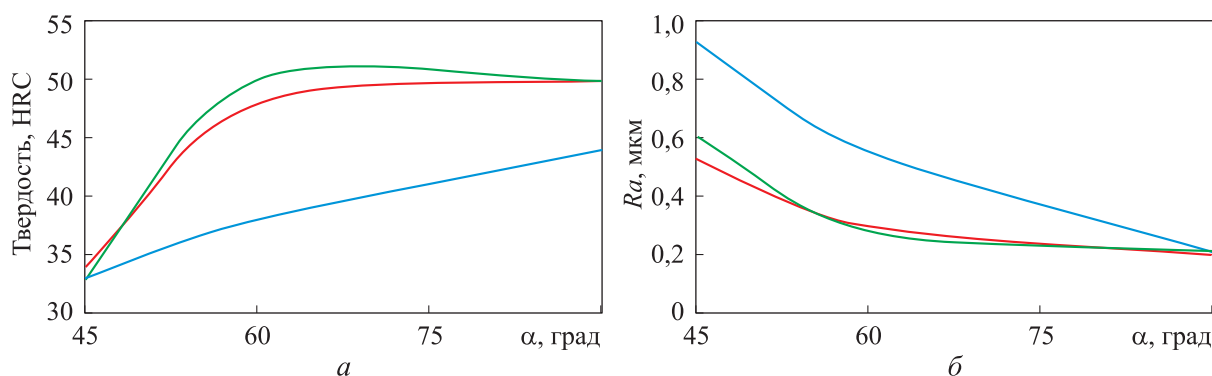
Дальнейшее развитие технологии МПВ часть авторов видят в комбинировании с методом ультразвукового воздействия с частотой 20...40 кГц [15, 16], что приводит к увеличению глубины наклепанного слоя до 0,5 мм.

Основными производителями накатного инструмента являются компании ECOROLL AG [7] и Lambda Technologies [17].

Цель статьи — определение зависимости шероховатости обработанной поверхности и ее твердости по Роквеллу от угла наклона и шага инструмента.

Методика проведения эксперимента. Образцы и оборудование. Для оценки эффективности МПВ выбран плоский образец из никелевого сплава размером 100×30×12 мм. Эскиз образца с зонами обработки показан на рис. 2. Одну из сторон образца предварительно фрезеровали до $Ra = 3,2$ мкм. Параметр шероховатости необработанной стороны (после электроэрозионной обработки) $Ra = 6,3$. Исходная твердость — 24 HRC.

Упрочняющую обработку проводили инструментом с деформирующим элементом из карбида вольфрама. Внешний вид станочной оснастки для МПВ показан на рис. 3, а фрагмент закрепления образца и процесса обработ-

Рис. 5. Зависимости твердости (а) и параметра шероховатости Ra (б) от угла наклона инструмента относительно нормали α при шаге $t = 0,8$ (—), 2,0 (—) и 3,0 мм (—)

ки — на рис. 4, где α — угол наклона инструмента относительно нормали.

Параметр шероховатости измеряли прибором Mahr MarSurf PS1 на базе 5,6 мм, твердость по Роквеллу — прибором TP 5006.

Измерение ОН проводили методом рентгеновской дифрактометрии с использованием комплекса XStress Robot. В качестве варьируемых параметров обработки выступали угол наклона инструмента относительно нормали α (45, 60, 90°) и шаг инструмента t (0,8; 2,0 и 3,0 мм).

Результаты эксперимента. После упрочнения плоских образцов измеряли три параметра — шероховатость, твердость обработанной поверхности и уровень ОН — в пяти точках зоны обработки.

Результаты измерения параметра шероховатости и твердости приведены на рис. 5, а и б. Видно, что увеличение угла наклона относительно нормали приводит к уменьшению твердости и возрастанию параметра шероховатости. С ростом шага инструмента повышается твердость и снижается параметр шероховатости. При шаге инструмента $t = 2,0$ и 3,0 мм значения твердости и параметра шероховато-

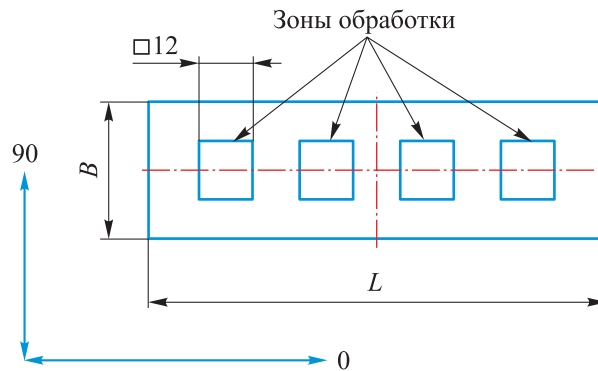


Рис. 6. Схема контроля ОН в образцах

сти оказались схожими с полученными при шаге $t = 0,8$ мм.

Упрочнение МПВ удовлетворяет требованиям конструкторской документации к шероховатости.

Схема контроля ОН в образцах показана на рис. 6. Результаты контроля ОН (средние значения по пяти измерениям) под разными углами наклона инструмента приведены на рис. 7, а–г. Направление обработки — 0 и 90°, шаг выглаживания — 3 мм.

Фрезерование наводит большие ОН сжатия вдоль направления обработки и растяжения в перпендикулярном направлении (см. рис. 7).

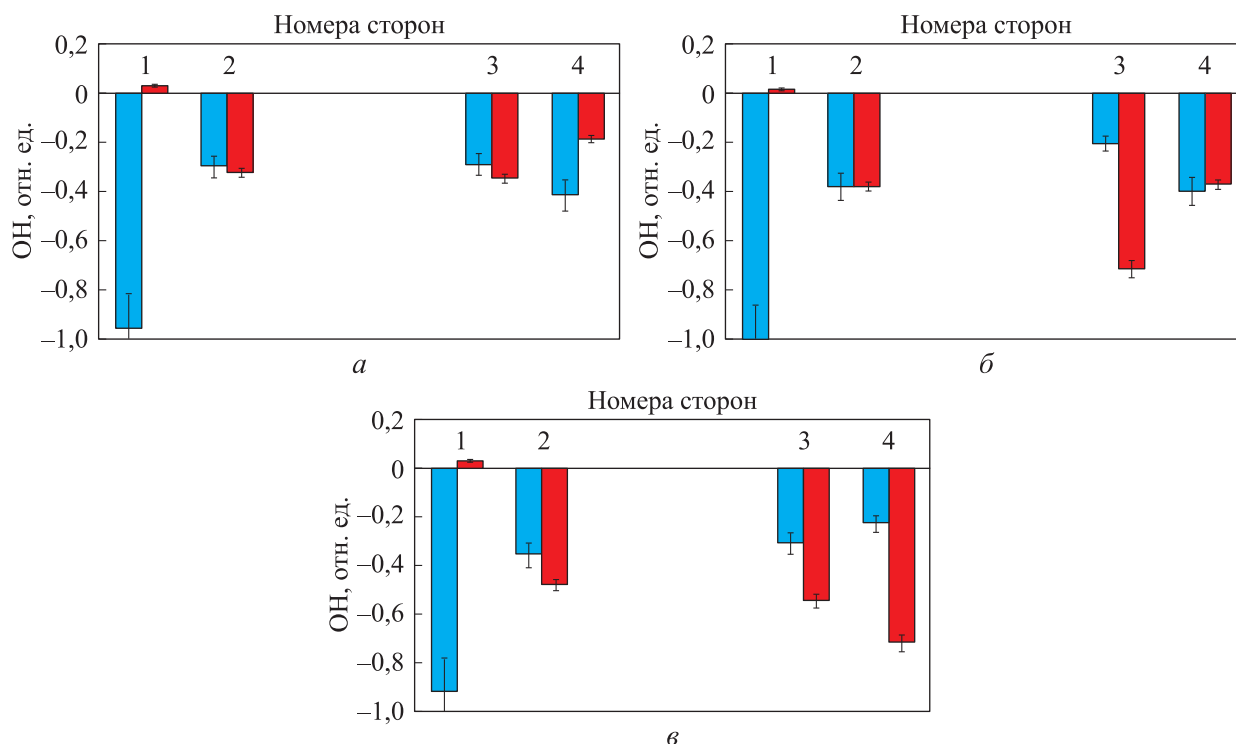


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений по сторонам образца после фрезерования вдоль (■) и поперек (■) направления обработки инструментом с углом наклона $\alpha = 45$ (а), 60 (б) и 90° (в): 1 и 2 — до и после фрезерования стороны А; 3 и 4 — до и после обработки стороны Б

МПВ приводит к выравниванию ОН сжатия после фрезерования в обоих направлениях от –250 МПа при угле наклона инструмента $\alpha = 45^\circ$ до –400 МПа при $\alpha = 60$ и 90° . Это также наблюдается после электроэрозионной обработки.

Выводы

1. После упрочнения МПВ шероховатость поверхности уменьшилась в 2 раза (до 0,208 мкм).

2. Увеличение угла инструмента относительно нормали приводит к увеличению шероховатости до 0,92 мкм и уменьшению твердости до 33 HRC. Обработку рекомендовано выполнять с наклоном до 60° .

3. МПВ наводит ОН сжатия в диапазоне –0,48...–0,30 отн. ед. вне зависимости от предварительной обработки поверхности образца, способствует выравниванию значений ОН в двух направлениях. Наибольшие ОН сжатия возникают при диаметре инструмента 2...3 мм.

Литература

- [1] Берестевич А.И. *Повышение эксплуатационных свойств рабочих лопаток ГТУ на основе управления процессом формирования их структуры*. Дисс. ... канд. тех. наук. Рыбинск, 2023. 172 с.
- [2] Комиссарова М.Р. *Повышение износостойкости сплавов на основе железа и титана с помощью электролитно-плазменного насыщения азотом и углеродом*. Дисс. ... канд. тех. наук. Кострома, 2021. 156 с.
- [3] Горохов В.А., Спиридонов Н.В. *Способы отделочно-упрочняющей обработки материалов*. Минск, Технопринт, 2003. 96 с.
- [4] Mahajan D., Tajane R. A review on ball burnishing process. *Int. J. Sci. Res. Publ.*, 2013, vol. 3, no. 4. URL: <https://www.ijsrp.org/research-paper-0413.php?rp=P161004>
- [5] Dzierwa A., Markopoulos P.A. Influence of ball-burnishing process on surface topography parameters and tribological properties of hardened steel. *Machines*, 2019, vol. 7, no. 1, art. 11, doi: <https://doi.org/10.3390/machines7010011>
- [6] Степанова Т.Ю. *Технологии поверхностного упрочнения деталей машин*. Иваново, ИГХТУ, 2009. 64 с.
- [7] *Инструментальные технологии улучшения металлических поверхностей*. URL: https://www.rp-ural.ru/wp-content/uploads/2021/05/Ecoroll_RU.pdf (дата обращения: 15.09.2025).
- [8] Ширяев А.А., Габов И.Г., Миленин А.С. и др. Сравнение методов упрочнения на предел выносливости лопаток из титанового сплава. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2023, № 4, с. 109–117.
- [9] Горохов В.А. *Чистовая обработка титановых сплавов*. Москва, Машиностроение, 1975. 109 с.
- [10] Attabi S., Himour A., Laouar L. et al. Mechanical and wear behaviors of 316L stainless steel after ball burnishing treatment. *J. Mater. Res. Technol.*, 2021, vol. 15, pp. 3255–3267, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.081>
- [11] Lavrys S.M., Pohrelyuk I.M., Lukyanenko A.G. Fatigue limit of two-phase titanium alloy after surface deformation-diffusion treatment. *JOM*, 2023, vol. 75, no. 4, pp. 1251–1260, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05659-5>
- [12] Sequera A., Fu C.H., Guo Y.B. et al. Surface integrity of Inconel 718 by ball burnishing. *J. of Materi. Eng. and Perform.*, 2014, vol. 23, no. 9, pp. 3347–3353, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1093-6>
- [13] Папшев Д.Д. *Упрочнение деталей обкаткой шариками*. Москва, Машиностроение, 1968. 132 с.
- [14] Rotella G., Rinaldi S., Filice L. Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, vol. 106, no. 2, pp. 431–440, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04631-z>
- [15] Jerez-Mesa R., Travieso-Rodríguez J.A., Landon Y. et al. Comprehensive analysis of surface integrity modification of ball-end milled Ti-6Al-4V surfaces through vibration-assisted ball burnishing. *J. Mater. Process. Technol.*, 2019, vol. 267, pp. 230–240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.022>

- [16] Velazquez Corral E., Wagner V., Jerez Mesa R. et al. Wear resistance and friction analysis of Ti6Al4V cylindrical ball-burnished specimens with and without vibration assistance. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2023, vol. 131, no. 2, pp. 551–562, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10919-y>
- [17] Low plasticity burnishing-LPB*. *lambdatechs.com*: веб-сайт. URL: <https://www.lambdatechs.com/low-plasticity-burnishing-lpb/> (дата обращения: 15.09.2025).

References

- [1] Berestevich A.I. *Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv rabochnik lopatok GTU na osnove upravleniya protsessom formirovaniya ikh struktury*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the performance properties of gas turbine blades by controlling the process of their structure formation. Kand. tech. sci. diss.]. Rybinsk, 2023. 172 p. (In Russ.).
- [2] Komissarova M.R. *Povyshenie iznosostoykosti spлавov na osnove zheleza i titana s pomoshchyu elektrolitno-plazmennogo nasyshcheniya azotom i uglerodom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing the wear resistance of iron- and titanium-based alloys using electrolyte-plasma saturation with nitrogen and carbon. Kand. tech. sci. diss.]. Kostroma, 2021. 156 p. (In Russ.).
- [3] Gorokhov V.A., Spiridonov N.V. *Sposoby otdelochno-uprochnyayushchey obrabotki materialov* [Methods of finishing and strengthening treatment of materials]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2003. 96 p. (In Russ.).
- [4] Mahajan D., Tajane R. A review on ball burnishing process. *Int. J. Sci. Res. Publ.*, 2013, vol. 3, no. 4. URL: <https://www.ijserp.org/research-paper-0413.php?rp=P161004>
- [5] Dzierwa A., Markopoulos P.A. Influence of ball-burnishing process on surface topography parameters and tribological properties of hardened steel. *Machines*, 2019, vol. 7, no. 1, art. 11, doi: <https://doi.org/10.3390/machines7010011>
- [6] Stepanova T.Yu. *Tekhnologii poverkhnostnogo uprochneniya detaley mashin* [Surface hardening technologies for machine parts]. Ivanovo, IGKhTU Publ., 2009. 64 p. (In Russ.).
- [7] *Instrumentalnye tekhnologii uluchsheniya metallicheskih poverkhnostey* [Instrumental technologies for improving metal surfaces]. URL: https://www.rp-ural.ru/wp-content/uploads/2021/05/Ecoroll_RU.pdf (accessed: 15.09.2025). (In Russ.).
- [8] Shiryaev A.A., Gabov I.G., Milenin A.S. et al. Comparison of hardening methods on blades of titanium alloy. *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2023, no. 4, pp. 109–117. (In Russ.).
- [9] Gorokhov V.A. *Chistovaya obrabotka titanovykh spлавov* [Finishing of titanium alloys]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975. 109 p. (In Russ.).
- [10] Attabi S., Himour A., Laouar L. et al. Mechanical and wear behaviors of 316L stainless steel after ball burnishing treatment. *J. Mater. Res. Technol.*, 2021, vol. 15, pp. 3255–3267, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.081>
- [11] Lavrys S.M., Pohrelyuk I.M., Lukyanenko A.G. Fatigue limit of two-phase titanium alloy after surface deformation-diffusion treatment. *JOM*, 2023, vol. 75, no. 4, pp. 1251–1260, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05659-5>
- [12] Sequera A., Fu C.H., Guo Y.B. et al. Surface integrity of Inconel 718 by ball burnishing. *J. of Materi. Eng. and Perform.*, 2014, vol. 23, no. 9, pp. 3347–3353, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1093-6>
- [13] Papshev D.D. *Uprochneniye detaley obkatkoy sharikami* [Strengthening of parts by ball rolling]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1968. 132 p. (In Russ.).
- [14] Rotella G., Rinaldi S., Filice L. Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, vol. 106, no. 2, pp. 431–440, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04631-z>
- [15] Jerez-Mesa R., Travieso-Rodríguez J.A., Landon Y. et al. Comprehensive analysis of surface integrity modification of ball-end milled Ti-6Al-4V surfaces through vibration-assisted ball burnishing. *J. Mater. Process. Technol.*, 2019, vol. 267, pp. 230–240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.022>
- [16] Velazquez Corral E., Wagner V., Jerez Mesa R. et al. Wear resistance and friction analysis of Ti6Al4V cylindrical ball-burnished specimens with and without vibration assistance. *Int. J.*

Adv. Manuf. Technol., 2023, vol. 131, no. 2, pp. 551–562, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10919-y>

[17] *Low plasticity burnishing-LPB**. *lambdatechs.com: website*. URL: <https://www.lambdatechs.com/low-plasticity-burnishing-lpb/> (accessed: 15.09.2025).

Статья поступила в редакцию 17.10.2025

Информация об авторах

ШИРЯЕВ Алексей Александрович — инженер отдела КО-2993. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: shiryaev-aal@avid.ru).

КАРМАНОВ Вадим Владимирович — заведующий кафедрой «Инновационные технологии машиностроения». ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 29, e-mail: karmanovs@yandex.ru).

МОРДВИН Михаил Анатольевич — доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения». ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 29, e-mail: mmordvin@yandex.ru).

Information about the authors

SHIRYAEV Aleksey Aleksandrovich — Engineer, Department КО-2993. UEC-Aviadvigatel JSC (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 93, e-mail: shiryaev-aal@avid.ru).

KARMANOV Vadim Vladimirovich — Head of the Department of Innovative Mechanical Engineering Technologies. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29, e-mail: karmanovs@yandex.ru).

MORDVIN Mikhail Anatol'evich — Associate Professor, Department of Innovative Mechanical Engineering Technologies. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29, e-mail: mmordvin@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ширяев А.А., Карманов В.В., Мордвин М.А. Влияние малопластичного выглаживания на твердость, шероховатость и остаточные напряжения образцов из никелевого сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 7, с. 76–82.

Please cite this article in English as:

Shiryaev A.A., Karmanov V.V., Mordvin M.A. Effect of low-plasticity burnishing on hardness, roughness and residual stresses of nickel alloy samples. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 7, pp. 76–82.