

УДК 621.787, 620.179.18, 621.7.07, 621.789

Влияние малопластичного выглаживания на параметры поверхностного слоя образцов лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава

И.Г. Габов, А.С. Миленин, А.А. Ширяев, Ю.В. Попова

АО «ОДК-Авиадвигатель»

Low-plastic burnishing impact on the surface layer parameters of samples of the gas turbine engine compressor blades made of titanium alloy

I.G. Gabov, A.S. Milenin, A.A. Shiryaev, Yu.V. Popova

JSC UEC-Aviadvigatel

Гидродробеструйное упрочнение, наиболее часто применяемое для повышения прочности и стойкости пера лопаток газотурбинного двигателя, создает благоприятную эпюру остаточных напряжений сжатия на поверхности пера и позволяет увеличить предел выносливости до 19 %. Однако при таком методе упрочнения глубина остаточных напряжений сжатия составляет не более 0,2 мм, чего недостаточно для обеспечения требуемого уровня усталостной прочности лопаток при повреждении кромок типа забоины вследствие попадания посторонних предметов на глубину до 1 мм. Для повышения стойкости лопаток к попаданию посторонних предметов предложен перспективный метод упрочнения — малопластичное выглаживание. Для оценки эффективности метода выбрана титановая лопатка первого каскада компрессора газотурбинного двигателя. Малопластичному выглаживанию подвергали зону кромок пера лопаток шириной 5 мм. Установлено, что поверхность пера лопатки после такого упрочнения удовлетворяет требованиям конструкторской документации по шероховатости. Глубина остаточных напряжений сжатия при малопластичном выглаживании, превысила 0,3 мм, что больше, чем при гидродробеструйной обработке. Микроструктура лопаток после упрочнения не изменилась, а микрорельеф их поверхности в зоне упрочнения представлял собой множество углублений в виде параллельных дорожек шириной 0,1 мм. Выходная кромка лопаток оказалась сильно деформированной с наличием волнистости и утонения, что можно объяснить неправильным подбором режима упрочнения.

EDN: LWOOQO, <https://elibrary/lwooqo>**Ключевые слова:** малопластичное выглаживание, шероховатость и микротвердость, остаточные напряжения, микроструктура лопаток, титановый сплав, поверхностный слой образцов

Hydro-shot peening is most often used to increase strength and durability of the gas turbine engine blade airfoils, creates a favorable diagram of compressive residual stresses on the airfoil surface and makes it possible to increase the endurance limit up to 19%. However, the compressive residual stresses depth with this peening method is not more than 0.2 mm, which is not enough to ensure the required fatigue strength level of the blades in

case of damage to the nick-type edges due to foreign objects attacking to the depth of 1 mm. To increase the blade resistance against foreign objects, the paper proposes a promising peening method, i.e. the low-plasticity burnishing. To evaluate efficiency of each method, an object was selected, it was a titanium blade of the gas turbine engine compressor first stage. The blade airfoil edge section with the width of 5 mm was subjected to the low-plasticity burnishing. It was established that the blade airfoil surface after such peening satisfied requirements of the design documentation in roughness. The compressive residual stresses depth in the low-plasticity burnishing exceeding 0.3 mm turned out to be lower than in the hydro-shot peening. The blade microstructure was not changing after peening, and their surface micro-relief in the peening zone consisted of many depressions in the form of parallel tracks 0.1 mm wide. The blade trailing edge turned out to be highly deformed with waviness and thinning, which could be explained by incorrect selection of the peening mode.

EDN: LWO0QO, <https://elibrary/lwo0qo>

Keywords: low-plasticity burnishing, roughness and micro-hardness, residual stresses, blade microstructure, titanium blade, sample surface layer

Эксплуатационные свойства детали, как правило, можно улучшить термической обработкой: закалкой, отпуском, отжигом и т. д. Несмотря на их высокую стоимость и временные затраты, иногда термической обработки оказывается недостаточно для получения необходимых свойств материала. Поэтому в производстве прибегают к таким процессам поверхностной пластической деформации (ППД), как обкатывание роликом или шариком.

Вследствие локальной пластической деформации топография поверхности изменяется, поверхностные слои измельчаются и возникают остаточные напряжения сжатия (ОНС) [1]. Так как ППД увеличивает усталостную прочность (которая остается основной причиной разрушения деталей), важно подобрать технологию ППД и режимы обработки, обеспечивающие требуемые показатели качества поверхности.

Метод малопластичного выглаживания (Low Plasticity Burnishing — LPB) представляет собой обработку поверхностного слоя шариком/шариками под гидростатическим давлением. Тре-

буемое давление обеспечивает маслостанция: отдельная или в составе станка с числовым программным управлением (ЧПУ).

При малопластичном выглаживании (МПВ) происходит пластическая деформация поверхностного слоя материала. В этом случае материал детали в поверхностном слое течет, пики неровностей опускаются почти нормально к ее поверхности, заполняя впадины неровностей (рис. 1). Гладкую поверхность обеспечивает течение материала в поверхностном слое, а не сгиб вершин микронеровностей и их сплющивания.

Этот вид упрочнения можно применять вместо других процессов, предназначенных для получения поверхностей высокого качества, таких как шлифование, тонкое точение и полирование.

Метод МПВ может быть использован на большинстве типов оборудования (универсальных и с ЧПУ станков, обрабатывающих центрах). Он позволяет упрочнять деталь за один установ непосредственно после общей обработ-

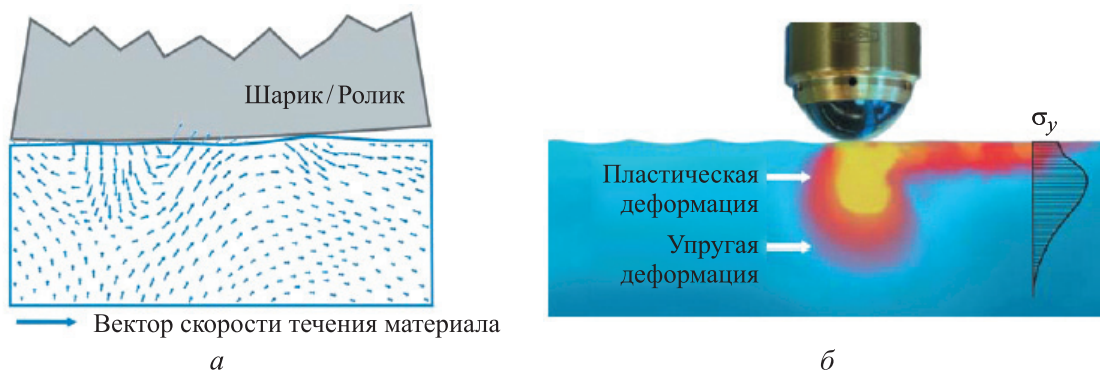


Рис. 1. Схема (а) и модель (б) процесса упрочнения поверхности МПВ

ки. Схема и модель процесса упрочнения поверхности МПВ показаны на рис. 1.

В работе [2] получена зависимость микротвердости титанового сплава BT1-1 от усилия обкатывания и диаметра шарика.

Методика выбора и расчета параметров режима отделки ППД описана в книге [3].

Установлено [4], что с возрастанием поверхностного усилия обкатывания шаром увеличивается твердость материала, HV: для стали 12X18H9T — с 181 до 342, для титанового сплава BT3-1 — с 319 до 390, для никелевого сплава ХН67ВМТЮ — с 282 до 412.

В работе [5] исследовано влияние различных факторов на ОНС: давления, подачи, скорости движения, размеров рабочего инструмента, числа проходов, структуры и свойств материала.

В публикациях [1, 3, 4] показано, что параметры скорости движения, подачи, силы прижатия шарика, его радиуса и числа проходов оказывают влияние на шероховатость и твердость поверхности. Глубина упрочненного слоя зависит от силы прижатия рабочего инструмента. Однако при силе прижатия более 100 Н возрастает риск шелушения и образования микротрещин поверхностного слоя. Наилучший результат по шероховатости поверхности достигается после трех–четырех проходов.

В работе [2] для материала Ti-6Al-4V исследована задача оптимизации — наведение максимальных ОНС. Для моделирования процесса разработана модель нелинейного конечного элемента с высокой точностью трехмерной нелинейности. Показано, что большие ОНС на поверхности компонентов можно обеспечить уменьшением диаметра шарика, или увеличением числа проходов. Кроме того, для достижения большей глубины ОНС необходимо увеличить диаметр шарика.

В статье [6] исследована зависимость шероховатости поверхности от вида финишной обработки: шлифования, полирования и др. Проанализированы варьируемые параметры при накатке. Установлено, что чаще всего в качестве смазочно-охлаждающей жидкости применяют дизельное топливо, керосин и SAE-масла.

Наибольшее количество работ связано с алюминиевыми и стальными сплавами, реже — с титановыми и жаропрочными. Основными контролируемыми параметрами после упрочнения являются шероховатость и микротвердость поверхности [7–17], реже — ОНС и микроструктура [18–20].

Целесообразно использовать МПВ как предварительную операцию перед диффузионной обработкой [21], что приводит к большей глубине диффузионной зоны и увеличению усталостной долговечности на 15 %.

Также изучено влияние покрытия рабочего инструмента и криогенных условий на шероховатость обрабатываемой поверхности [22, 23]. Показано, что применение смазывающего охлаждения жидким азотом при обработке сплавом Ti-6Al-4V приводит к незначительному улучшению шероховатости поверхности (0,35 мкм) по сравнению с исходной (0,32 мкм) [23].

По мнению некоторых исследователей, дальнейшее развитие МПВ связано с добавлением ультразвукового воздействия с частотой 20...40 кГц [24, 25], что увеличивает глубину наклепанного слоя до 0,5 мм.

Основными производителями рабочего инструмента для МПВ являются компании ECOROLL AG и Lambda Technologies, где для обработки применяют керамический шарик из нитрида кремния [19]. В Российской Федерации нет серийного производства инструмента для МПВ.

Цель работы — оценить влияние МПВ на параметры качества поверхностного слоя лопатки: уровень и глубину ОНС, шероховатость и микроструктуру.

Методика проведения эксперимента. Образцы и оборудование. Для оценки эффективности МПВ выбрана титановая лопатка первого каскада компрессора газотурбинного двигателя, эскиз которой показан на рис. 2.

Упрочняли зоны кромок, так как они в первую очередь подвержены повреждениям от попадания посторонних предметов (льда, пес-

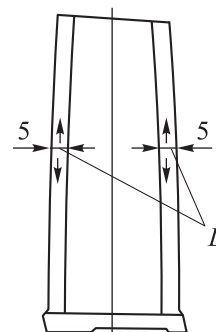


Рис. 2. Эскиз титановой лопатки первого каскада компрессора ГТД с зонами упрочнения кромок пера

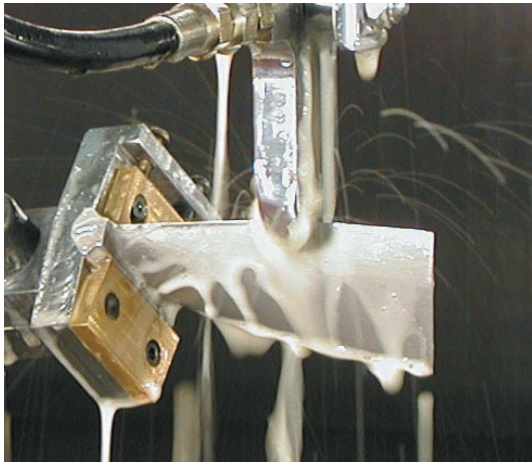


Рис. 3. Схема закрепления образца в процессе обработки

ка, птиц, мусора на взлетно-посадочной полосе и др.). Согласно статистическим данным, чаще всего встречаются повреждения на входной кромке лопаток глубиной до 1 мм, реже — до 3...4 мм. Чтобы исключить или замедлить рост трещины от повреждения ширина зоны упрочнения L должна составлять 5 мм.

Упрочняющую обработку проводили керамическими шариками с обеих сторон. Схема закрепления образца в процессе обработки показана на рис. 3.

К упрочнению МПВ предъявляли следующие требования:

- неухудшение предела выносливости лопаток;
- обеспечение благоприятной эпюры ОНС на глубину до 1 мм;
- повышение предела выносливости лопаток с забоиной;
- неухудшение геометрических параметров и шероховатости поверхностного слоя.

Указанные требования к упрочнению МПВ обусловлены тем, чтобы не допустить снижения коэффициента полезного действия и параметров газотурбинного двигателя.

Морфологию поверхности образцов после обработки МПВ исследовали с помощью микроскопа MIRA3 TESCAN. Степень наклепа и микротвердость поверхности измеряли прибором Метолаб-502, шероховатость поверхности — прибором Mahr MarSurf PS1 на базе 5,6 мм. Для определения ОНС методом Давиденкова использовали установку АПООН.

Результаты эксперимента. После упрочнения лопаток определяли следующие параметры:

шероховатость поверхности и уровень ОНС, микроструктуру и геометрические параметры.

Шероховатость поверхности. Этот параметр измеряли в десяти точках на кромках лопаток с обеих сторон, приняв за 100 % значение шероховатости, указанное в конструкторской документации (КД). Полученные результаты приведены на рис. 4, где видно, что упрочнение МПВ удовлетворяет требованиям КД по шероховатости поверхности.

Уровень ОНС. Этот параметр определяли методом Давиденкова на кромках спинки и корыта. Результаты приведены на рис. 5. За ноль приняли уровень ОНС в лопатках без упрочнения, за минус единицу — максимальный уровень ОНС в лопатках после упрочнения.

Глубина ОНС после упрочнения превысила 0,3 мм. Как видно из рис. 5, уровень ОНС резко увеличивается на глубине $h = 0...45$ мкм, достигает максимума на глубине $h = 45$ мкм и плавно уменьшается до глубины $h = 300$ мкм.

Микроструктура и поверхность лопаток. Полученный микрорельеф поверхности лопаток в зоне упрочнения представлял собой множество углублений в виде параллельных дорожек шириной 0,1 мм, ориентированных перпендикулярно кромке (рис. 6). На некоторых

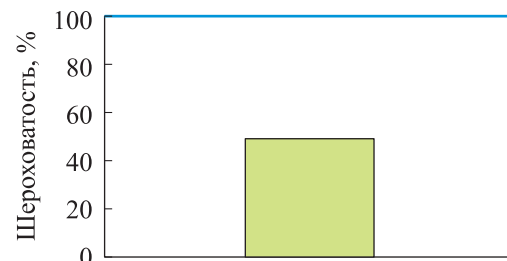


Рис. 4. Значения шероховатости поверхности лопаток после упрочнения МПВ (■) и согласно требованиям КД (—)

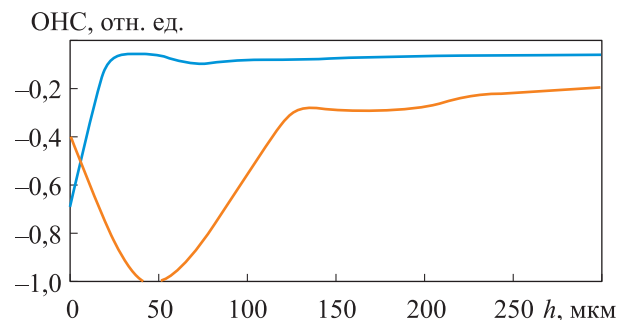


Рис. 5. Распределение ОНС по глубине h неупрочненной (—) и упрочненной (—) лопаток

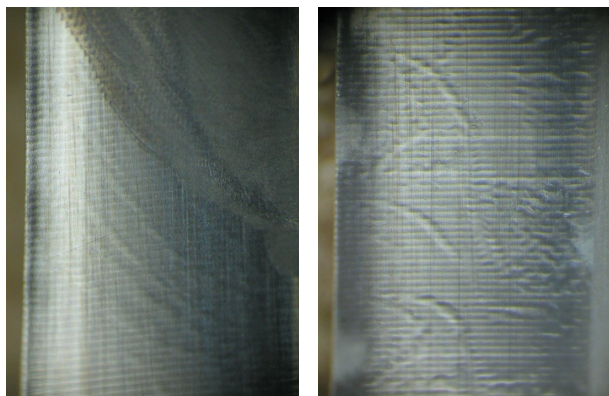


Рис. 6. Микрорельеф поверхности лопатки в зоне упрочнения со стороны корыта (а) и спинки (б) при увеличении $\times 20$



Рис. 7. Внешний вид упрочненной выходной кромки лопатки с утонением (а) и волнистостью (б)

лопатках поверх дорожек наблюдался неопределенный узор, несоответствующий структуре материала.

Выходная кромка лопаток после МПВ оказалась сильно деформированной — практически без радиуса, с наличием утонения до толщины 0,2 мм и волнистости (рис. 7).

Микроструктуры лопатки до и после упрочнения оказались идентичными, структурных изменений не наблюдалось (рис. 8).

Литература

- [1] Подзея А.В., ред. *Технологические остаточные напряжения*. Москва, Машиностроение, 1973. 216 с.
- [2] Горохов В.А. *Чистовая обработка титановых сплавов*. Москва, Машиностроение, 1975. 107 с.
- [3] Горохов В.А., Спиридонов Н.В. *Способы отделочно-упрочняющей обработки материалов*. Минск, Технопринт, 2003. 96 с.

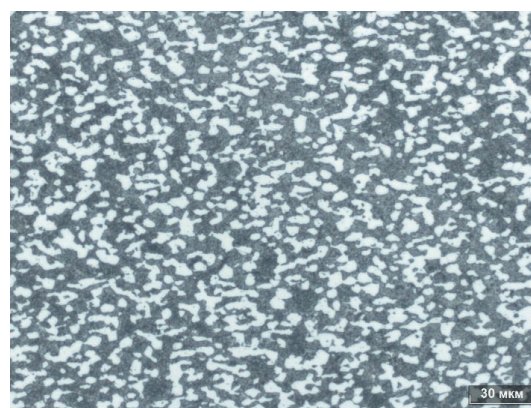
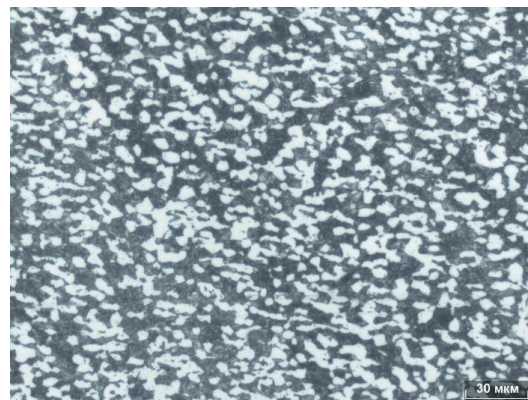


Рис. 8. Микроструктуры поверхности лопатки до (а) и после (б) упрочнения

Выводы

1. Шероховатость поверхности лопатки после упрочнения МПВ уменьшилась в 2 раза.
2. При МПВ глубина ОНС на входной кромке с обеих сторон превысила 0,3 мм.
3. Выходная кромка лопаток после упрочнения оказалась сильно деформированной, с наличием волнистости и утонения.
4. Метод МПВ не удовлетворяет требованиям по упрочнению и неухудшению геометрических параметров изделия. Необходимо провести отработку режимов упрочнения, а именно уменьшить силу прижатия шариков к лопатке.

- [4] Горохов В.А. *Обработка деталей пластическим деформированием*. Киев, Техніка, 1978. 192 с.
- [5] Папшев Д.Д. *Упрочнение деталей обкаткой шариками*. Москва, Машиностроение, 1968. 132 с.
- [6] Mahajan D., Tajane R. A review on ball burnishing process. *Int. J. Sci. Res. Publ.*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 1–8.
- [7] 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>
- [8] Attabi S., Himour A., Laouar L. et al. Mechanical and wear behaviors of 316L stainless steel after ball burnishing treatment. *J. Mater. Res. Technol.*, 2022, no. 15, pp. 3255–3267, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.081>
- [9] Инструментальные технологии улучшения металлических поверхностей. URL: https://www.rp-ural.ru/wp-content/uploads/2021/05/Ecoroll_RU.pdf (дата обращения: 15.09.2023).
- [10] Attabi S., Himour A., Laouar L. et al. Effect of ball burnishing on surface roughness and wear of AISI 316L SS. *J. Bio. Tribo Corros.*, 2021, vol. 7, no. 1, art. 7, doi: <https://doi.org/10.1007/s40735-020-00437-9>
- [11] Capilla-González G., Martínez-Ramírez I., Díaz-Infante D. et al. Effect of the ball burnishing on the surface quality and mechanical properties of a TRIP steel sheet. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 116, no. 11–12, pp. 3953–3964, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07715-x>
- [12] Livatyali H., Has E., Türköz M. Prediction of residual stresses in ball burnishing Ti6Al4V thin sheets. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, vol. 110, no. 4–5, pp. 1083–1093, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05837-2>
- [13] López de Lacalle L.N., Lamikiz A. et al. The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces. *The Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, vol. 32, no. 9, pp. 958–968, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0402-5>
- [14] Loll N.H., Tam S.C., Miyazawa S. Investigations on the surface roughness produced by ball burnishing. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1991, vol. 31, no. 1, pp. 75–81, doi: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(91\)90052-5](https://doi.org/10.1016/0890-6955(91)90052-5)
- [15] El-Axir M.H. An investigation into roller burnishing. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2000, vol. 40, no. 1, pp. 1603–1617, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00019-5)
- [16] El-Taweel T.A., El-Axir M.H. Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2009, vol. 41, no. 3, pp. 301–310, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1485-6>
- [17] Klocke F., Bäcker V., Wegner H. et al. Influence of process and geometry parameters on the surface layer state after roller burnishing of IN718. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 2009, vol. 3, no. 4, pp. 391–399, doi: <https://doi.org/10.1007/s11740-009-0182-0>
- [18] Han K., Zhang D., Yao C. et al. Studies and optimization of surface roughness and residual stress in ball burnishing of Ti60 alloy. *J. of Materi. Eng. and Perform.*, 2022, vol. 31, no. 5, pp. 3457–3470, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06457-x>
- [19] 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>
- [20] Golden P.J., Shepard M.J. Life prediction of fretting fatigue with advanced surface treatments. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2007, vol. 468–470, pp. 15–22, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.168>
- [21] 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>
- [22] 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, no. 106, no. 1, pp. 431–440, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04631-z>
- [23] Tang J., Luo H.Y., Zhang Y.B. Enhancing the surface integrity and corrosion resistance of Ti-6Al-4V titanium alloy through cryogenic burnishing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, no. 88, no. 9–12, pp. 2785–2793, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9000-y>

- [24] Jerez-Mesa R., Travieso-Rodríguez J.A. 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, no. 267, pp. 230–240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.022>
- [25] 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, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10919-y>

References

- [1] Podzeya A.V., ed. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya* [Technological residual stresses]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 216 p. (In Russ.).
- [2] Gorokhov V.A. *Chistovaya obrabotka titanovykh splavov* [Finishing processing of titanium alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 107 p. (In Russ.).
- [3] Gorokhov V.A., Spiridonov N.V. *Sposoby otdelochno-uprochnyayushchey obrabotki materialov* [Methods of finishing and strengthening processing of materials]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2003. 96 p. (In Russ.).
- [4] Gorokhov V.A. *Obrabotka detaley plasticheskim deformirovaniem* [Processing of details by plastic deformation]. Kiev, Tekhnika Publ., 1978. 192 p. (In Russ.).
- [5] Papshev D.D. *Uprochnenie detaley obkatkoy sharikami* [Strengthening of details by ball rolling]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 132 p. (In Russ.).
- [6] Mahajan D., Tajane R. A review on ball burnishing process. *Int. J. Sci. Res. Publ.*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 1–8.
- [7] 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>
- [8] Attabi S., Himour A., Laouar L. et al. Mechanical and wear behaviors of 316L stainless steel after ball burnishing treatment. *J. Mater. Res. Technol.*, 2022, no. 15, pp. 3255–3267, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.081>
- [9] *Instrumentalnye tekhnologii uluchsheniya metallicheskih poverkhnostey* [Tool technologies for improvement of metal surfaces]. URL: https://www.rp-ural.ru/wp-content/uploads/2021/05/Ecoroll_RU.pdf (accessed: 15.09.2023). (In Russ.).
- [10] Attabi S., Himour A., Laouar L. et al. Effect of ball burnishing on surface roughness and wear of AISI 316L SS. *J. Bio. Tribo Corros.*, 2021, vol. 7, no. 1, art. 7, doi: <https://doi.org/10.1007/s40735-020-00437-9>
- [11] Capilla-González G., Martínez-Ramírez I., Díaz-Infante D. et al. Effect of the ball burnishing on the surface quality and mechanical properties of a TRIP steel sheet. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 116, no. 11–12, pp. 3953–3964, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07715-x>
- [12] Livatyali H., Has E., Türköz M. Prediction of residual stresses in ball burnishing Ti6Al4V thin sheets. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, vol. 110, no. 4–5, pp. 1083–1093, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05837-2>
- [13] López de Lacalle L.N., Lamikiz A. et al. The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces. *The Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, vol. 32, no. 9, pp. 958–968, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0402-5>
- [14] Loll N.H., Tam S.C., Miyazawa S. Investigations on the surface roughness produced by ball burnishing. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1991, vol. 31, no. 1, pp. 75–81, doi: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(91\)90052-5](https://doi.org/10.1016/0890-6955(91)90052-5)
- [15] El-Axir M.H. An investigation into roller burnishing. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2000, vol. 40, no. 1, pp. 1603–1617, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00019-5)
- [16] El-Taweel T.A., El-Axir M.H. Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2009, vol. 41, no. 3, pp. 301–310, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1485-6>
- [17] Klocke F., Bäcker V., Wegner H. et al. Influence of process and geometry parameters on the surface layer state after roller burnishing of IN718. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 2009, vol. 3, no. 4, pp. 391–399, doi: <https://doi.org/10.1007/s11740-009-0182-0>

- [18] Han K., Zhang D., Yao C. et al. Studies and optimization of surface roughness and residual stress in ball burnishing of Ti60 alloy. *J. of Materi. Eng. and Perform.*, 2022, vol. 31, no. 5, pp. 3457–3470, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06457-x>
- [19] 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>
- [20] Golden P.J., Shepard M.J. Life prediction of fretting fatigue with advanced surface treatments. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2007, vol. 468–470, pp. 15–22, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.168>
- [21] 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>
- [22] 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, no. 106, no. 1, pp. 431–440, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04631-z>
- [23] Tang J., Luo H.Y., Zhang Y.B. Enhancing the surface integrity and corrosion resistance of Ti-6Al-4V titanium alloy through cryogenic burnishing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, no. 88, no. 9–12, pp. 2785–2793, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9000-y>
- [24] Jerez-Mesa R., Travieso-Rodríguez J.A. 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, no. 267, pp. 230–240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.022>
- [25] 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, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10919-y>

Статья поступила в редакцию 18.09.2023

Информация об авторах

ГАБОВ Иван Григорьевич — начальник отделения 299. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: gabov-ig@avid.ru).

МИЛЕНИН Артем Сергеевич — начальник отдела КО-2993. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: milenin-as@avid.ru).

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

ПОПОВА Юлия Владимировна — начальник бюро металлографических исследований. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: yropova@avid.ru).

Information about the authors

GABOV Ivan Grigorievich — Head of Department 299. JSC UEC-Aviadvigatel (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 93, e-mail: gabov-ig@avid.ru).

MILENIN Artem Sergeevich — Head of Department КО-2993. JSC UEC-Aviadvigatel (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 93, e-mail: milenin-as@avid.ru).

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

POPOVA Yuliya Vladimirovna — Head of Bureau of Metallographic Research. JSC UEC-Aviadvigatel (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 93, e-mail: yropova@avid.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Габов И.Г., Миленин А.С., Ширяев А.А., Попова Ю.В. Влияние малопластичного выглаживания на параметры поверхностного слоя образцов лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 4, с. 39–46.

Please cite this article in English as:

Gabov I.G., Milenin A.S., Shiryaev A.A., Popova Yu.V. Low-plastic burnishing impact on the surface layer parameters of samples of the gas turbine engine compressor blades made of titanium alloy. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 4, pp. 39–46.