

# Ударное вибрационное накатывание конструкционной стали



**Д. Ю. Ершов,**  
доцент кафедры  
машиностроения<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук,  
эл. почта:  
Ershov\_DYu@pers.spmi.ru



**П. В. Шишкин,**  
доцент кафедры  
транспортно-технологических  
процессов и машин<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук,  
эл. почта: shishkinp@spmi.ru



**Д. А. Клочков,**  
аспирант кафедры  
машиностроения<sup>1</sup>,  
эл. почта:  
Klochkov\_DA@pers.spmi.ru



**М. Э. Кокрицкий,**  
магистрант кафедры  
машиностроения<sup>1</sup>,  
эл. почта:  
s232407@stud.spmi.ru

Представлено исследование ударного вибрационного накатывания конструкционных сталей. Вибрационное накатывание отличается от обычного тем, что деформируемому элементу дополнительно сообщается возвратно-поступательное (осциллирующее) движение вдоль оси обрабатываемой детали. Осциллирующее движение деформирующего элемента создает синусоидальный след инструмента, который накладывается на винтовую линию, образованную в результате кинематической связи обрабатываемой детали с инструментом. Повышение точности (уменьшение допуска) размера детали при образовании полностью нового микрорельефа зависит от параметров исходной шероховатости, размеров деформирующего элемента и режимов обработки. Приведены результаты экспериментального исследования зависимости шероховатости поверхности, поверхностной твердости от изменения параметров ударного вибрационного накатывания. Показана зависимость высоты микронеровностей профиля от номинальной глубины вдавливания, подачи и диаметра деформирующего шара для различных марок стали. Получена зависимость поверхностной твердости от номинальной глубины вдавливания, подачи и диаметра деформирующего шара и зависимость среднего шага микронеровностей от подачи для исследуемых марок конструкционной стали.

**Ключевые слова:** поверхностное деформирование, поверхностная твердость, микронеровность профиля, вибрационное накатывание, удар, регулярный микрорельеф, шероховатость, упрочнение, конструкционная сталь.

**DOI:** 10.17580/chm.2024.09.14

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

## Введение

Существуют различные методы окончательной отделочной обработки деталей машин, обеспечивающие такие требуемые качества, как шероховатость, благоприятные остаточные напряжения в поверхностном слое, способствующие повышению износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости [1–3].

В настоящее время поверхностно-пластичному деформированию посвящено достаточно большое число работ как для различных марок сталей [4–6], так и цветных металлов и сплавов [7–9].

Поверхностно-пластическое деформирование деталей широко применяют в узлах и агрегатах горнодобывающей и горно-обогатительной техники [10–12], станкостроения [13, 14] и при производстве изделий для нефте- и газодобывающей отрасли [15–17].

Ударное вибрационное накатывание является процессом чистовой обработки металлов поверхностным пластическим деформированием за счет периодического ударного вдавливания инструмента в обрабатываемую поверхность, обеспечивающего образование регулярного микрорельефа [18–20], упрочнение поверхностного слоя и, как следствие, существенное улучшение эксплуатационных характеристик

изделий. Принципиальная схема процесса, параметры, оборудование, результаты промышленного применения, а также разновидности поверхностей, получаемых при ударном вибронакатывании, описаны в работе [21]. Все исследования выполнены на основе системного подхода, описанного в работах [21–23].

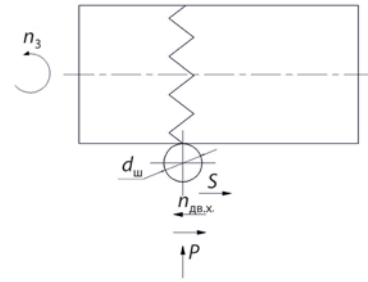
Целью данной работы является экспериментальное исследование зависимости шероховатости поверхности и поверхностной твердости от изменения параметров процесса обработки ударным вибронакатыванием: силы ударного вибронакатывания  $P$ , величины подачи  $S$ , числа оборотов заготовки  $n_3$ , диаметра деформирующего шара  $d_{ш}$ , частоты осциллирующих колебаний  $n_{дв.х}$  (число двойных колебаний в минуту).

Схема ударного вибрационного накатывания представлена на **рис. 1**.

Указанные зависимости исследовали только для полностью нового регулярного микрорельефа с дискретными регулярными выступами и впадинами.

### Материалы и методика исследования

Цилиндрические образцы из конструкционной стали длиной 230–250 мм и диаметром 40 мм с исходной поверхностью, полученной точением, разбивали на 10–12 участков длиной 20–25 мм. Каждый участок обрабатывали с различными режимами ударного вибронакатывания; для сравнения оставляли один участок образца с исходной поверхностью. После обработки на каждом участке измеряли поверхностную твердость по Виккерсу при нагрузке 5 кг твердомером Метолаб 421, диаметр образцов в 2–3 взаимно перпендикулярных сечениях микрометром, а также шероховатость поверхности профилометром Mitutoyo Surftest SJ-210 [21, 22]. Образцы для исследования изготовили из широко применяемых в промышленности конструкционных марок сталей, существенно отличающихся физико-механическими свойствами: 2Х13; 40Х; сталь 25; 9ХС; 30ХГСН2А. Обработку ударным вибронакатыванием проводили на токарно-винторезном станке JET GHB-1340А с помощью специальной установки при частоте осцилляции деформирующего шара 2800 двойных ходов в минуту.

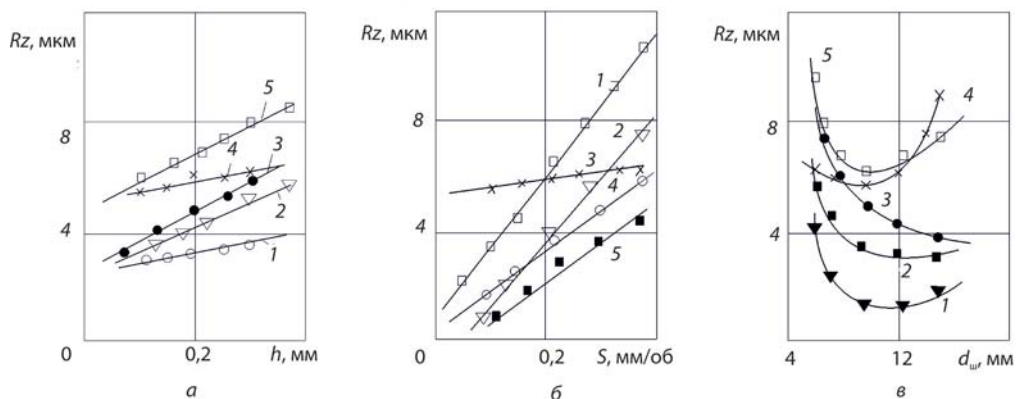


**Рис. 1.** Схема ударного вибрационного накатывания

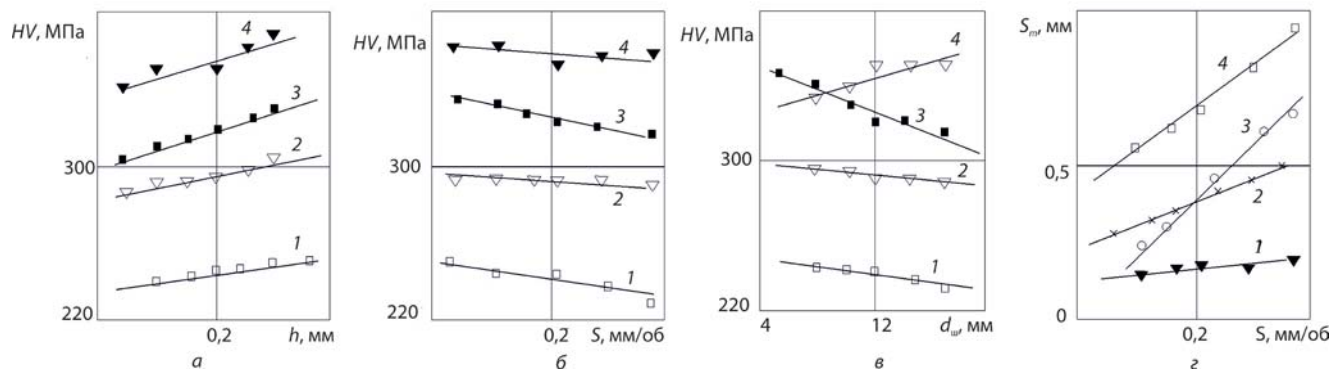
### Результаты исследования и их обсуждение

Определение силы ударного вибронакатывания крайне затруднительно и недостаточно разработано, поэтому величину усилия ударного вибронакатывания оценивали по косвенному показателю: номинальной глубине вдавливания деформирующего шара в обрабатываемые материалы  $h$ . Для этого перед началом обработки находили точку касания деформирующего шара с обрабатываемой поверхностью в крайнем переднем положении ползуна, что соответствовало нулевому усилию, а затем рукояткой поперечной подачи станка смещали установку для ударного вибронакатывания на 0,1; 0,2; 0,3 мм, т. е. на фиксированную величину  $h$ , тем самым определяя глубину внедрения индентора. Зависимости высоты микронеровностей профиля по десяти точкам от параметров ударного вибронакатывания представлены на **рис. 2**. Характерные для этой зависимости кривые получены аппроксимацией опытных точек графика линейной зависимости. С увеличением глубины проникновения деформирующего шара в обрабатываемый материал заметно увеличивается и высота микронеровностей. Зависимость  $R_z = f(h)$  получена при диаметре деформирующего шара  $d_{ш} = 12$  мм, числе оборотов заготовки  $n_3 = 31,5$  об/мин и подаче  $S = 0,21$  мм/об.

Увеличение высоты микронеровностей профиля происходит и при повышении подачи (см. рис. 2, б). Зависимость  $R_z = f(S)$  получена при  $d_{ш} = 12$  мм;  $n_3 = 31,5$  об/мин и глубине вдавливания  $h = 0,2$  мм.



**Рис. 2.** Зависимость высоты микронеровностей профиля от номинальной глубины вдавливания (а), подачи (б) и диаметра деформирующего шара (в) для различных марок конструкционной стали: 1 — 2Х13; 2 — 40Х; 3 — сталь 25; 4 — 9ХС; 5 — 30ХГСН2А



**Рис. 3.** Зависимость поверхностной твердости от номинальной глубины вдавливания (а), подачи (б), диаметра деформирующего шара (в) и зависимости среднего шага неровностей от подачи (z) для различных марок конструкционной стали: 1 — 2Х13; 2 — 40Х; 3 — сталь 25; 4 — 9ХС

При условии сохранения регулярного микрорельефа с дискретными элементарными выступами и впадинами изменение числа оборотов заготовки при постоянных других параметрах ударного вибронакатывания допустимо лишь в очень малом диапазоне. Как показали результаты испытания, изменение числа оборотов заготовки практически не влияет на высоту микронеровностей профиля [23, 24].

Согласно зависимости высоты неровностей профиля от диаметра деформирующего шара (см. рис. 2, в), полученной при  $h = 0,2$  мм,  $n_3 = 31,5$  об/мин и  $S = 0,21$  мм/об, при увеличении диаметра деформирующего шара до 12 мм наблюдается значительное сглаживание шероховатости поверхности, однако дальнейшее увеличение диаметра деформирующего шара приводит к росту высоты неровностей профиля. Такое повышение шероховатости поверхности с увеличением диаметра шара более 12 мм можно объяснить тем, что уменьшение удельного давления с увеличением диаметра шара сказывается сильнее, чем увеличение опорной его поверхности, за счет которой сначала и сглаживается шероховатость поверхности. Таким образом, для получения минимальной шероховатости при ударном вибронакатывании необходимо определение оптимального диаметра деформирующего шара [25, 26].

Зависимость среднего шага неровностей от величины подачи при  $d_{ш} = 12$  мм,  $n_3 = 31,5$  об/мин приведена на рис. 3, z. Средний шаг неровностей при ударном вибронакатывании возрастает с увеличением подачи. Изменение других параметров ударного вибронакатывания (усилия, диаметра шара и числа оборотов заготовки) на средний шаг неровностей в исследованном диапазоне изменений этих параметров не влияет.

Зависимости поверхностной твердости при обработке ударным вибронакатыванием от изменения параметров этого процесса показаны на рис. 3, а–в. Значения поверхностной твердости получены с учетом поправочных коэффициентов для выпуклых цилиндрических поверхностей согласно ГОСТ Р ИСО 6501-1–2007 [27].

Как видно из рис. 3, а, опытные точки хорошо аппроксимируются линейной зависимостью: с ростом усилия ударного вибронакатывания закономерно возрастает поверхностная

твердость и, следовательно, происходит существенное упрочнение обрабатываемой поверхности.

Увеличение подачи при ударном вибронакатывании (см. рис. 3, б) приводит к некоторому уменьшению поверхностной твердости ввиду снижения кратности приложения нагрузки [28, 29].

С увеличением диаметра деформирующего шара удельная нагрузка уменьшается, что приводит к снижению поверхностной твердости (см. рис. 3, в).

Диаметр исходной заготовки при ударном вибрационном накатывании изменяется в процессе обработки, при этом в зависимости от параметров процесса это может быть и уменьшение, и увеличение диаметра [30, 31]. Увеличение диаметра возможно за счет образования наплывов при ударе [32, 33], а уменьшение — вдавливания поверхностного слоя [34–36]. Величина изменения диаметра исходной заготовки в результате обработки ударным вибронакатыванием в исследуемом диапазоне изменения параметров процесса ( $d_{ш} = 8 \div 17$  мм,  $n_3 = 12,5 \div 31,5$  об/мин,  $S = 0,11 \div 0,47$  мм/об,  $h = 0,1 \div 0,3$  мм) не превышает 0,02 мм.

В ходе проведенного исследования дополнительно получили результаты обработки заготовки из стали 40Х точением при частоте вращения заготовки 1250 об/мин, подаче 0,18 мм/об (рис. 4, а) и последующим ударным вибронакатыванием с целью получения регулярного микропрофиля (см. рис. 4, б).

Шероховатость поверхности изделия определяли при помощи профилометра Mitutoyo Surftest SJ-210. Полученные профилограммы шероховатости поверхностного слоя обрабатываемой заготовки приведены на рис. 5.

Видно, что после обработки ударным вибронакатыванием шероховатость поверхности образца уменьшилась более чем в 3 раза, что обуславливает необходимость проведения такой финишной обработки ответственных деталей механизмов различной техники машиностроительной отрасли.

### Заключение

В ходе выполненных исследований установлена возможность направленного выбора параметров виброударного накатывания

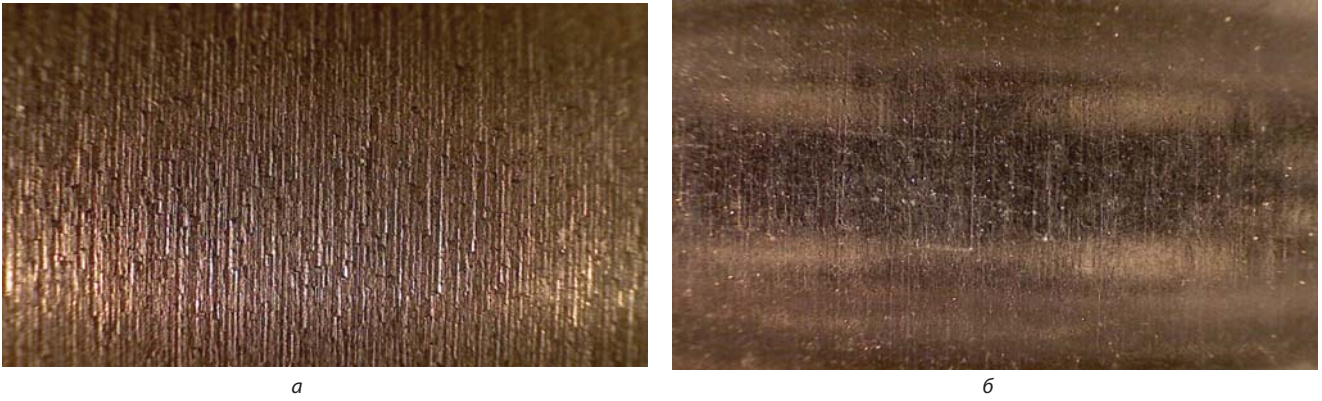
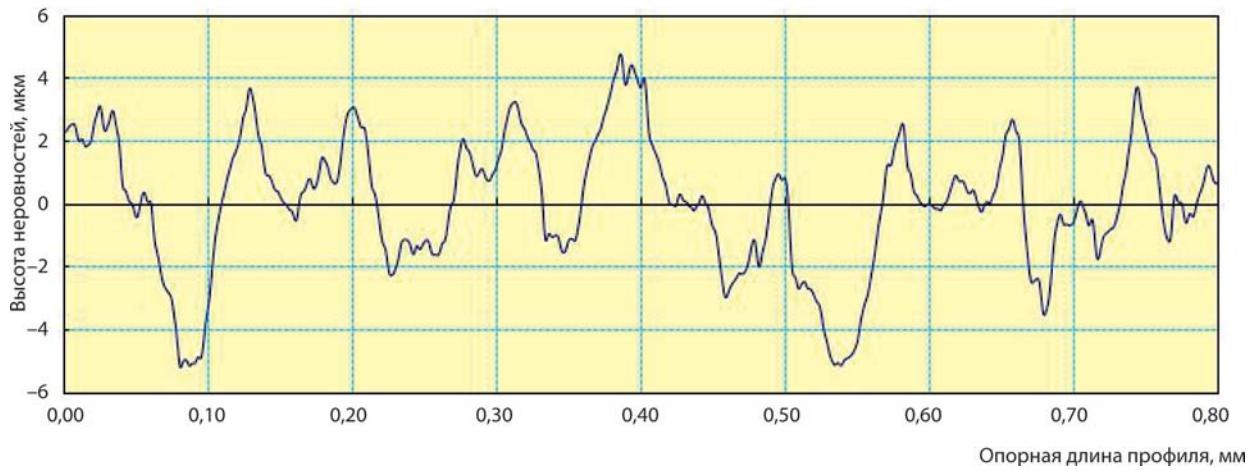
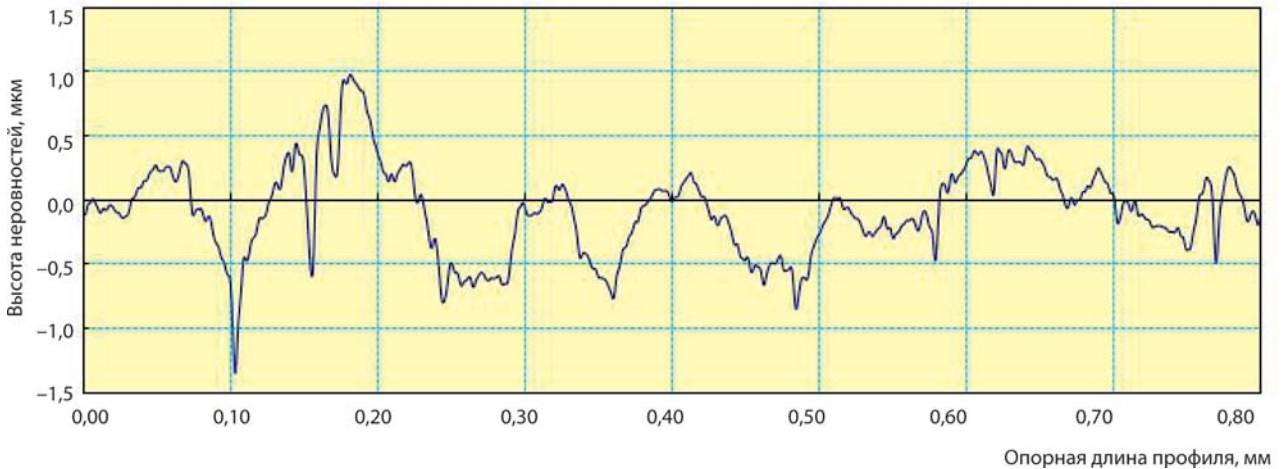


Рис. 4. Внешний вид исследуемого образца: поверхность до (а) и после (б) ударного вибронакатывания



а



б


Рис. 5. Профилограммы поверхностного слоя образца: до (а) и после (б) ударного вибронакатывания

в зависимости от конкретных требований к качеству поверхности обработанной детали из конструкционных сталей.

В результате проведения ударного вибрационного накатывания достигнуто значительное упрочнение поверхностного слоя деталей, благоприятная форма микронеровностей

и микрорельефа, которая характеризуется полой формой выступов и впадин с радиусами на 1,5–2 порядка большими, чем при обработке резанием.

По сравнению с накатыванием способ ударного вибронакатывания позволил снизить шероховатость поверхности

в 1,5 раза и отклонение от круглости на 10 %, что обеспечит повышение износостойкости ответственных деталей из исследуемых марок конструкционных сталей. 

"Chernye metally", 2024, No. 9, pp. 88–92  
DOI: 10.17580/chm.2024.09.14

### Impact vibration knurling of structural steel

#### Information about authors

**D. Yu. Ershov**, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Mechanical Engineering<sup>1</sup>, e-mail: Ershov\_Dyu@pers.spmi.ru;

**P. V. Shishkin**, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Transport and Technological Processes and Machines<sup>1</sup>, e-mail: shishkinp@mail.ru;

**D. A. Klochkov**, Postgraduate Student, Dept. of Mechanical Engineering<sup>1</sup>, e-mail: Klochkov\_DA@pers.spmi.ru;

**M. E. Kokritsky**, Master's Student, Dept. of Mechanical Engineering<sup>1</sup>, e-mail: s232407@stud.spmi.ru

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

**Abstract:** The work is devoted to the study of impact vibration knurling of structural steels. Vibratory knurling differs from conventional knurling in that the deforming element is additionally given a reciprocating (oscillating) motion along the axis of the workpiece. The oscillating movement of the deforming element creates a sinusoidal trace of the tool, which is superimposed on the helical line formed as a result of the kinematic connection between the workpiece and the tool. The change in the size of the workpiece when a completely new microrelief is formed depends on the parameters of the initial roughness, the size of the deforming element and the machining modes. This paper presents the results of experimental study of the dependence of surface roughness, surface hardness and geometrical dimensions on the change of parameters of shock vibration knurling. The dependence of the height of profile irregularities on the nominal depth of indentation, feed, diameter of deforming ball for different steel materials is given. The dependence of surface hardness on the nominal depth of indentation, feed, diameter of the deforming ball and the dependence of the average pitch of irregularities on the feed for the investigated grades of structural steel was obtained.

**Key words:** surface deformation, surface hardness, profile roughness, vibration rolling, impact, regular microrelief, roughness, hardening, structural steel.

#### References

- Zhang J., Huang X., Kang X., Yi H. et al. Energy field-assisted high-speed dry milling green machining technology for difficult-to-machine metal materials. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 18, Iss. 2. 28. DOI: 10.1007/s11465-022-0744-9.
- Vologzhanina S. A., Ermakov B. S., Ermakov S. B., Sleptsov O. I. Investigation of material properties for cryogenic products produced by additive manufacturing techniques. *Metallurgist*. 2023. Vol. 67. pp. 644–651. DOI: 10.1007/s11015-023-01552-x.
- Zellagui R., Hemmouche L., Ait-Sadi H., Chelli A. Effect of element addition, microstructure characteristics, mechanical properties, machining and welding processes of the Hadfield austenitic manganese steel. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2022. Vol. 67, Iss. 3. pp. 863–868. DOI: 10.24425/amm.2022.139676.
- Fu P., Zhan K., Jiang C. H. Micro-structure and surface layer properties of 18CrNiMo7-6 steel after multistep shot peening. *Mater. Des.* 2013. Vol. 51. pp. 309–314. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.04.011.
- Yun Z., Zhenkuan S., Qilong W., Tingchao L. et al. Improving the mechanical properties of 304 stainless steel using waterjet peening. *Mater. Sci.* 2018. Vol. 26. pp. 161–167. DOI: 10.5755/j01.ms.26.2.21117.
- Wang Y. M., Ma E. Strain hardening, strain rate sensitivity, and ductility of nanostructured metals. *Mater. Sci. Eng. A*. 2004. Vol. 375–377. pp. 46–52. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.214.
- Maksarov V. V., Maksimov D. D., Sinyukov M. S. Quality control of complex contour surfaces in aluminium alloy items during magnetic abrasive finishing. *Tsvetnye Metally*. 2023. No. 4. pp. 96–102.
- Hou X. N., Qin H. F., Gao H. Y., Mankoci S. et al. A systematic study of mechanical properties, corrosion behavior and biocompatibility of AZ31B Mg alloy after ultrasonic nanocrystal surface modification. *Mater. Sci. Eng. C*. 2017. Vol. 78. pp. 1061–1071. DOI: 10.1016/j.msec.2017.04.128.
- Amanov A., Urmanov B., Amanov T., Pyun Y. S. Strengthening of Ti-6Al-4V alloy by high temperature ultrasonic nanocrystal surface modification technique. *Mater. Lett.* 2017. Vol. 196. pp. 198–201. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.03.059.
- Shishlyannikov D. I., Zverev V. Y., Zvonareva A. G., Frolov S. A. et al. Evaluation of the energy efficiency of functioning and increase in the operating time of hydraulic drives of sucker-rod pump units in difficult operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 261. pp. 349–362.
- Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinik S. Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 242. p. 228. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.228.
- Serbin D. V., Dmitriev A. N. Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 833–842. DOI: 10.31897/PMI.2022.82.

### Библиографический список

См. англ. блок.

- Kulchitskiy A. Optical inspection systems for axisymmetric parts with spatial 2d resolution. *Symmetry*. 2021. Vol. 13, Iss. 7. 1218. DOI: 10.3390/sym13071218.
- Maksarov V. V., Minin A. O., Zakhharova V. P. Ensuring surface quality in almn alloy items during high-frequency wave impact boring. *Tsvetnye Metally*. 2023. No. 4. pp. 90–95.
- Shakhnazarov K. Yu., Vologzhanina S. A., Khuznakhmetov R. M. Explanation of anomalies in the formation of structure and physical and mechanical properties of steels and alloys. *Informatsionno-tehnologicheskiiy vestnik*. 2023. No. 1. pp. 196–209.
- Wegener T. et al. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on microstructure, tensile and low-cycle fatigue behavior of additively manufactured stainless steel 316L. *Metals*. 2022. Vol. 12, Iss. 9. 1425. DOI: 10.3390/met12091425.
- Bolobov V. I., Plashchinsky V. A. Influence of impact duration on fracture efficiency in rocks and on plastic deformation of metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022. Vol. 3. pp. 78–96. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_78.
- Zhukov I. A., Martyshev N. V., Zyukin D. A., Azimov A. M. et al. modification of hydraulic hammers used in repair of metallurgical units. *Metallurgist*. 2023. Vol. 66, Iss. 11–12. pp. 1644–1652. DOI: 10.1007/s11015-023-01480-w.
- Vologzhanina S. A., Igolkin A. F., Peregudov A. A. Research of properties of austenitic steels. *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 887. pp. 242–246. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.887.242.
- Hotz H., Kirsch B., Aurich J. C. Impact of the thermomechanical load on subsurface phase transformations during cryogenic turning of metastable austenitic steels. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2021. Vol. 32, Iss. 1. pp. 877–894. DOI: 10.1007/s10845-020-01626-6.
- Suslova A. G. Technology and tools for finishing and hardening treatment of parts by surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie, 2014. 480 p.
- Dudkina N. G., Arisova V. N. Structure and properties of the surface layer of 40Kh steel subjected to electromechanical processing with dynamic force action. *Izvestiya vuzov. Chernaya Metallurgiya*. 2021. Vol. 64. No. 4. pp. 259–265. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-4-259-265.
- Zaydes S. A. Handbook: Surface plastic deformation processes. Irkutsk: Izdatelstvo IRNITU, 2021. 504 p.
- Klevtsov V. A., Timofeev D. Y., Khalimonenko A. D. Improved design of manufacturing processes for mining machines: basing concepts. *Russian Engineering Research*. 2023. Vol. 43, Iss. 11. pp. 1367–1375. DOI: 10.3103/S1068798X23110151.
- Zaydes S. A., Kuan Kh. M. Degree of hardening and depth of work hardening in pendulum surface plastic deformation of carbon steel. *Izvestiya vuzov. Chernaya Metallurgiya*. 2023. Vol. 66. No. 3. pp. 272–282. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-3-272-282.
- Li Y. et al. Effects of surface severe plastic deformation on the mechanical behavior of 304 stainless steel. *Metals*. 2020. Vol. 10, Iss. 6. 831. DOI: 10.3390/met10060831.
- GOST R ISO 6501-1–2007. Metallic materials. Vickers hardness test. Part 1: Test method. Measurement. Introduced: 01.08.2008.
- Patraev E. V., Vakulin M. S., Gordeev Yu. I., Yasinsky V. B. High-speed micromilling of parts made of composite materials and aluminum alloys. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2021. Vol. 12. pp. 62–72. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-12-62-72.
- Vogler M. P., Devor R. E., Kapoor S. G. On the modeling and analysis of machining performance in micro-end milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2004. Vol. 126, Iss. 4. pp. 685–694. DOI: 10.1115/1.1813470.
- Basova T. V., Andreev Y. S., Basova M. V. The development of cutting tools active control methodology for numerical control milling machines. 2022 *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2022. pp. 108–112. DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906666.
- Zubarev Yu. M., Kruglov A. I., Afanasenkov M. A. Selection of modifying elements for directing the properties of functional barrier sublayers of the surface layer of tool material. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. Vol. 11 (173). pp. 18–20.
- Altuntaş G., Altuntaş O., Bostan B. Evaluation of the effect of shallow cryogenic treatment on tribological properties and microstructure of high manganese steel. *Inter Metalcast*. 2024. Vol. 18. pp. 1523–1534. DOI: 10.1007/s40962-023-01131-5.
- Wang Z., Yang Y., Chen C., Li Y. et al. Effect of surface impacting parameters on wear resistance of high manganese steel. *Coatings*. 2023. Vol. 13. 539. DOI: 10.3390/coatings13030539.
- Sun S., Zhao A., Wu Q. Effect of strain rate on the work-hardening rate in high-Mn steel. *Materials Science and Technology*. 2017. Vol. 33, Iss. 11. pp. 1306–1311. DOI: 10.1080/02670836.2017.1288690.
- Shipulin L. V., Ardashev D. V. Concept of designing high-speed processing operations based on complex process simulation. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 46, Iss. 12. pp. 64–69. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.011.
- Chen Y., Cao H. J., Yang X. Research on load distribution characteristic on the cutting edge in high-speed gear hobbling process. *Journal of Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 53, Iss. 15. pp. 181–187. DOI: 10.3901/JME.2017.15.181.