

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №7 (133). С. 33-39.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №7 (133). P. 33-39.

Научная статья  
УДК 534-8; 621.77.04  
doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39

## Способы ультразвукового поверхностного пластического деформирования

Равиль Исламович Нигметзянов<sup>1</sup>, к.т.н.,  
Вячеслав Михайлович Приходько<sup>2</sup>, д.т.н.,  
Сергей Константинович Сундуков<sup>3</sup>, к.т.н.,  
Александр Вадимович Сухов<sup>4</sup>, аспирант,  
Дмитрий Сергеевич Фатюхин<sup>5</sup>, д.т.н.

<sup>1,2,3,4,5</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64

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

<sup>2</sup>prikhodko@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>3</sup>sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

<sup>4</sup>sukhov-aleksandr96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>5</sup>mitriy2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>

**Аннотация.** Рассмотрены существующие классификационные признаки способов ультразвукового поверхностного пластического деформирования и проанализированы их технологические возможности. Предложена классификация способов ультразвукового поверхностного пластического деформирования.

**Ключевые слова:** ультразвук, колебания, классификация, поверхностное пластическое деформирование

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00660, <https://rscf.ru/project/21-19-00660/>.

**Для цитирования:** Нигметзянов Р.И., Приходько В.М., Сундуков С.К., Сухов А.В., Фатюхин Д.С. Способы ультразвукового поверхностного пластического деформирования // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №7 (133). – С. 33-39. doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39

Original article

## Methods of ultrasonic surface plastic deformation

Ravil I. Nigmatzyanov<sup>1</sup>, Can. Sc.Tech.,  
Vyacheslav M. Prikhodko<sup>2</sup>, Dr. Sc. Tech.,  
Sergey K. Sundukov<sup>3</sup>, Can. Sc.Tech.,  
Alexander V. Sukhov<sup>4</sup>, post-graduate,  
Dmitry S. Fatyukhin<sup>5</sup>, Dr. Sc. Tech.

<sup>1,2,3,4,5</sup>Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI),  
125319, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64

<sup>1</sup>lefmo@yandex.ru, <sup>2</sup>prikhodko@madi.ru, <sup>3</sup>sergey-lefmo@yandex.ru,

<sup>4</sup>sukhov-aleksandr96@mail.ru, <sup>5</sup>mitriy2@yandex.ru

**Annotation.** The existing classification features of ultrasonic surface plastic deformation methods are viewed and their technological capabilities are studied. Methods of ultrasonic surface plastic deformation classification are proposed.

**Keywords:** ultrasound, vibrations, classification, surface plastic deformation

**Acknowledgements:** The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 21-19-00660, <https://rscf.ru/project/21-19-00660/>.

**For citation:** Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Methods of ultrasonic surface plastic deformation. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.7 (133), pp. 33-39. doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39

## Введение

Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование (УППД) широко применяется для модификации свойств поверхностей изделий. Этот вид обработки позволяет увеличить твердость, уменьшить шероховатость, создать сжимающие напряжения в поверхностных слоях самых различных изделий машиностроения, что обеспечивает значительное повышение их эксплуатационных свойств.

В настоящий момент применение ультразвука при ППД хорошо изучено, этому процессу посвящено множество работ, как фундаментальных [1, 2], так и прикладных [3 – 7]. Анализ литературных источников показал, что в большинстве работ различные способы УППД описываются разрозненно, как отдельные процессы, без группировки по тем или иным признакам.

В ГОСТ 18296-72 «Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения», в общих понятиях указано: «Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование – вибрационное пластическое деформирование при ультразвуковой частоте вибраций». Согласно тому же ГОСТу ультразвуковое воздействие может быть организовано по методам накатывания, раскатывания, обработки дробью и др.

С точки зрения технологического применения УППД можно разделить на следующие группы:

- по форме и расположению обрабатываемой поверхности изделия (внутренние; наружные; плоские; тела вращения; фасонные; криволинейные);
- по степени воздействия на материал;
- по форме получаемого микрорельефа.

Для реализации обработки по каждому признаку в рамках каждой группы необходим выбор технических решений, схем и параметров обработки.

Для реализации обработки по каждому признаку в рамках каждой группы необходим выбор технических решений, схем и параметров обработки.

В связи с этим целью данной работы является анализ существующих способов УППД и их группировка по технологическим, конструктивным и др. признакам для формирования структурированной классификации.

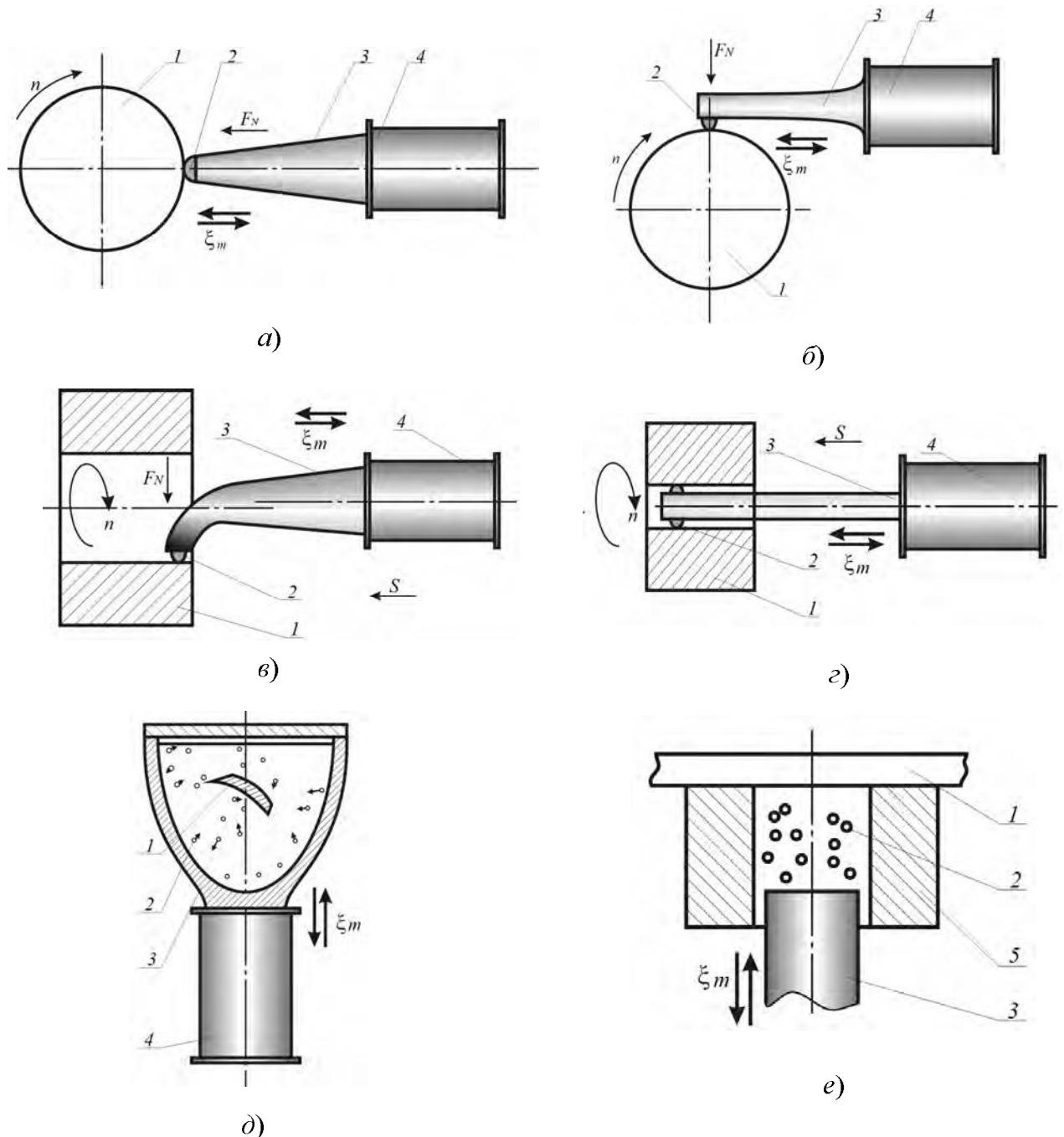
## Технологические признаки способов УППД

Основным фактором выбора технологии является форма и расположение обрабатываемой поверхности. Наиболее распространёнными схемами УППД являются схемы, представленные на рис. 1.

Метод ультразвукового упрочнения, предложенный в 1964 году И.И. Мухановым, отличается от обычного выглаживания тем, что инструмент совершает колебания с ультразвуковой частотой, причём амплитуда колебаний  $\xi_m$  поляризована в плоскости, перпендикулярной обрабатываемой поверхности детали (см. рис. 1, а). Этим же методом производят обработку наружных плоских и криволинейных поверхностей с большим радиусом кривизны по схемам контурного фрезерования [1]. Модификацией этого метода является выглаживание поверхностей с тангенциальным (см. рис. 1, б) и осевым (см. рис. 1, в) перемещением инструмента.

Для обработки внутренних поверхностей (отверстий) затруднена передача нормальных к поверхности колебаний инструмента. В этом случае используются схемы обработки с осевым перемещением инструмента и амплитудой колебаний, направленной касательно к обрабатываемой поверхности (см. рис. 1, в, г).

Обработка по схеме, представленной на рис. 1, д позволяет осуществлять УППД деталей сложной формы. В полости ультразвукового излучателя специальной формы размещаются обрабатываемые детали и деформирующие элементы, которые получают колебания от оболочки (излучателя).



**Рис. 1. Схемы обработки ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием ( $\xi_m$  – амплитуда колебаний,  $F_N$  – усилие прижима):**  
1 – обрабатываемое изделие; 2 – деформирующие элементы; 3 – волновод-концентратор; 4 – излучатель; 5 – оправка

Деформирование поверхности происходит в результате ударов деформирующих элементов, аналогично дробеструйной вибрационной обработке.

При обработке плоских поверхностей и поверхностей, имеющих большой радиус кривизны, обработка проводится по схеме, представленной на рис. 1, е. Находящиеся в объеме, ограниченном обрабатываемой поверхностью торцом ультразвукового волновода

и стенками оправки, деформирующие элементы свободно перемещаются под действием ультразвукового волновода.

По степени воздействия на материал отделочно-упрочняющую обработку принято разделять на отделочную, отделочно-упрочняющую и упрочняющую. Виды обработки отличаются между собой степенью пластического деформирования, которая определяется давлением в зоне контакта

инструмента и обрабатываемой поверхности [2].

При использовании УППД пиковое значение давления в зоне контакта определяется как выбором параметров обработки (амплитуды колебаний  $\xi_m$ , усилия прижима  $F_N$ ), так и наличием жесткой связи между индентором и излучателем. Способы УППД разделяют на ультразвуковое выглаживание, при котором излучатель жестко связан с индентором и ультразвуковую виброударную обработку с наличием зазора между ними.

При обработке связанным индентором усилие прижима  $F_N$  инструмента к обрабатываемой поверхности постоянно. Сила воздействия на поверхность имеет импульсный характер и изменяется от нуля до пикового значения, существенно превышающего  $F_N$ . В этом случае поверхностный слой формируется в результате многократных упругопластических деформаций, повторяющихся с частотой ультразвуковых колебаний [8].

В случае обработки свободным индентором, когда он колеблется в зазоре между излучателем и обрабатываемой поверхностью, воздействие на поверхность имеет принципиально иной характер. Индентор под действием импульса, полученного от ультразвукового излучателя, перемещается до соударения с обрабатываемой поверхностью, отскакивает от неё и движется к поверхности излучателя. После контакта с излучателем процесс повторяется. Колебания индентора в зазоре носят квазипериодический характер. Частота и сила ударов в основном зависят от величины зазора и амплитуды колебательной скорости излучателя.

Для выглаживания и виброударной обработки в зависимости от количества деформирующих элементов различают одно- и многоэлементную обработку. Наиболее распространена одноэлементная обработка, которая используется для УППД внутренних и наружных поверхностей вращения по схемам токарной обработки (см. рис. 1, а – в).

Многоэлементные инструменты применяются для обработки плоских и криволинейных поверхностей, имеющих большой радиус кривизны, а также сварных швов.

Обработка плоских и криволинейных поверхностей реализуется по схеме вертикального фрезерования. Аналогом фрезы является инструмент с 1...8 инденторами, расположенными по окружности относительно

оси вращения инструмента. Подобный способ позволяет достичь равномерности обработки и повысить ее производительность.

Отдельным направлением применения УППД является обработка сварных швов [1] с целью снижения остаточных сварочных напряжений и образованию напряжений сжатия в зонах концентраторов напряжений. Для этого используются многоэлементные инструменты со свободными инденторами, позволяющие ударно деформировать поверхности с любым характером неровностей, в том числе и поверхности сварного шва.

Способы УППД позволяют не только уменьшить шероховатость поверхности, но и получить специфический регулярный микро-рельеф поверхности. Например, нанесение на поверхность мелких маслосодержащих каналов обеспечивает удержание на ней смазочного материала.

Получение регулярного микро-рельефа поверхности может быть получено как за счёт создания определённой траектории движения инструмента, так и за счёт предварительного полученного микро-рельефа.

Если при УППД, осуществляемому по схеме токарной обработки (рис. 2), инструменту помимо подачи сообщается возвратно-поступательное перемещение вдоль оси обрабатываемой детали, на поверхность наносятся канавки образующие характерный рисунок.

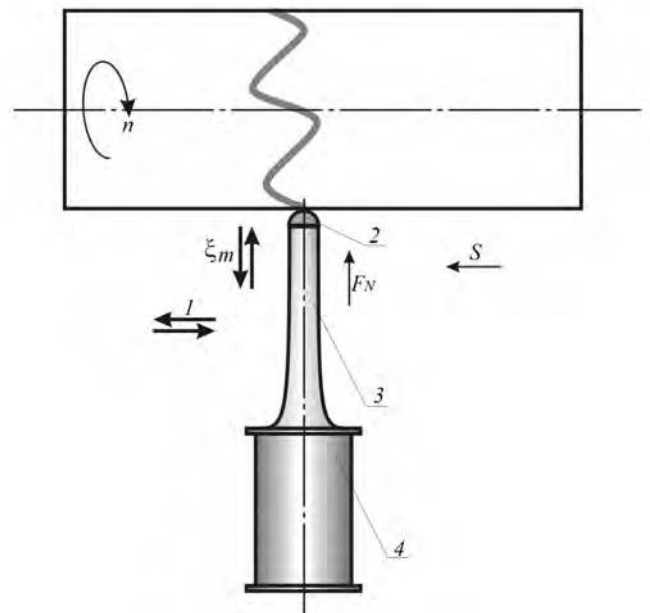


Рис. 2. Образование регулярного микро-рельефа поверхности при УППД

Форму и размеры рисунка можно регулировать, варьируя частоту вращения детали  $n$ , подачу  $s$  и амплитуду осцилляции деформирующего инструмента  $l$ . При этом в зависимости от сочетания указанных режимов канавки могут не пересекаться, пересекаться полностью, пересекаться не полностью или сливаться.

Другим способом получения регулярных микрорельефов является использование рельефа, созданного предыдущей обработкой, например, точением, накаткой и др. В этом

случае предварительно полученный рельеф выглаживается со значительным снижением высотных параметров шероховатости и увеличением площади опорной поверхности. При этом рисунок рельефа сохраняется в виде небольших рисок, глубину которых можно регулировать числом проходов ультразвукового инструмента.

В качестве примера на рис. 3 представлены профилограммы поверхности стали 45 после токарной обработки с последующим выглаживанием.

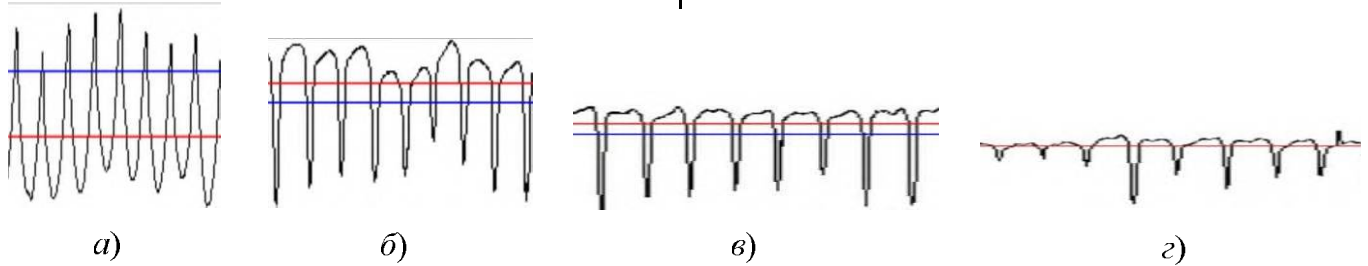


Рис. 3. Профиль поверхности после:

*a* – токарной обработки ( $Ra\ 22,5$ ); *б* – одного прохода индентора ( $Ra\ 4,6$ ); *в* – двух проходов индентора ( $Ra\ 2,4$ ); *г* – трех проходов индентора ( $Ra\ 1,5$ )

### Группировка способов УППД для составления классификации

На основании вышеизложенных технологических признаков предлагаются следующие классификационные признаки УППД:

- по схеме обработки;
- по поляризации колебаний индентора относительно обрабатываемой поверхности;
- по наличию связи между индентором и излучателем;

– по форме и характеру получаемого микрорельефа;

– по степени воздействия на материал.

Первые три признака могут быть сгруппированы в общую структуру стратегии перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности, связывающую взаимные перемещения обрабатываемой заготовки, волновода-концентратора и индентора (рис. 4).



Рис. 4. Группировка способов УППД по стратегии перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности

В приведённой структуре наиболее значимым признаком является схема обработки. Схема обработки определяет возможности поляризации колебаний волновода-концентратора и индентора относительно обрабатываемой поверхности, а также характер его перемещения. В свою

очередь характер перемещения определяет выбор способов одно- и многоэлементной обработки.

Группировка способов по другим признакам, связанным с формой поверхности и характером получаемого микрорельефа, представлена на схеме (рис. 5).

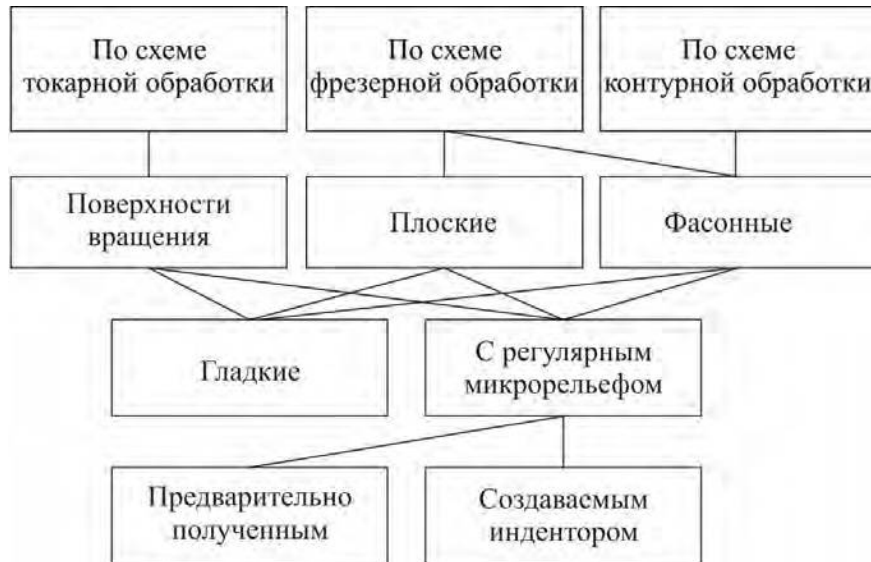


Рис. 5. Группировка способов УППД по форме поверхности и характеру получаемого микрорельефа

Так же как и на предыдущей схеме, возможности УППД по обработке поверхностей разных форм в большей степени определяются применяемой схемой обработки. Степень воздействия на материал в основном зависит от параметров обработки и использования типа индентора.

### Заключение

Проведённый анализ способов УППД показывает, что составление единственной иерархической структуры классификации затруднительно. Ввиду большого количества классификационных признаков в данном случае больше подходит множественная иерархия. Предлагаемые в статье классификационные признаки могут быть положены в основу создания общей классификации способов УППД.

Создание классификации способов УППД позволяет осуществлять системный выбор схемы обработки, оборудования и технологических параметров. Анализ классификационных признаков может быть использован при модернизации существующих и создании новых технологий ультразвукового поверхностного пластического деформирования,

а также создании гибридных технологий, основанных на комбинации механических, электрофизикохимических и химико-термическими методов обработки.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Мощный** ультразвук в металлургии и машиностроении / В.О. Абрамов, О.В. Абрамов, В.В. Артемьев [и др.]; под общ. ред. О.В. Абрамова и В.М. Приходько. – Москва: Янус-К, 2006. – 687 с.
2. **Инженерия** поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.
3. **Крылова, Н.А., Шуваев, В.Г.** Обеспечение надежности и качества поверхностей деталей ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2018. – Т. 2. – С. 205-206.
4. **Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С.** Влияние частоты колебаний на эффективность ультразвукового упрочнения // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – №12 (207). – С. 25-27.
5. **Ultrasonic Surface Rolling Process: Properties, Characterization, and Applications** / John, M., Ralls, A.M. et al. // Appl. Sci. 2021, 11(22), 10986.
6. **Chi Ma, Yalin Dong, Chang Ye** Improving Surface Finish of 3D-printed Metals by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, Procedia CIRP, Vol. 45, 2016, PP. 319-322.

7. Приходько, В.М., Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С. Инновационные технологические процессы с использованием ультразвука // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – №7 (73). – С. 11-14.

8. Приходько, В.М., Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С. Технологические возможности применения ультразвука для повышения эксплуатационных свойств изделий транспортного машиностроения // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – №7 (97). – С. 9-15.

## REFERENCES

1. Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering / V. O. Abramov, O. V. Abramov, V. V. Artemiev [and others]; under total ed. O. V. Abramova and V. M. Prikhodko. - Moscow: Janus-K, 2006. - 687 p. – ISBN 5-8037-0314-1.

2. Part Surface Engineering / Col. ed.; ed. A.G. Suslova. M.: Mashinostroenie. 2008. - 320 p.: ill.

3. Krylova, N.A., Shuvaev V.G. Ensuring the reliability and quality of surfaces of parts by ultrasonic surface plastic deformation // Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality». - 2018. - V. 2. - P. 205-206.

4. Nigmatzyanov, R. I., Sundukov S. K., Fatyukhin D. S. Influence of oscillation frequency on the efficiency of ultrasonic hardening // Proceedings of the Volgograd State Technical University. - 2017. - V. 12(207). - P. 25-27.

5. John, M.; Ralls, A.M.; Dooley, S.C.; Thazhathidathil, A.K.V.; Perka, A.K.; Kuruveri, U.B.; Menezes, P.L. Ultrasonic Surface Rolling Process: Properties, Characterization, and Applications. Appl. Sci. 2021, 11, 10986. <https://doi.org/10.3390/app112210986>

6. Chi Ma, Yalin Dong, Chang Ye, Improving Surface Finish of 3D-printed Metals by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, Procedia CIRP, Volume 45, 2016, Pages 319-322, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.339>

7. Innovative technological processes using ultrasound / V. M. Prikhodko, R. I. Nigmatzyanov, S. K. Sundukov, D. S. Fatyukhin // Science intensive technologies in mechanical engineering. - 2017. - V. 7(73). - P. 11-14.

8. Prikhodko V. M., Nigmatzyanov R. I., Sundukov S. K., Fatyukhin D. S. Technological possibilities of using ultrasound to improve the performance properties of transport engineering products // Science intensive technologies in mechanical engineering. - 2019. - V. 7(97). - P. 9-15. – DOI 10.30987/article\_5cf7bd2f98e797.67795796. – EDN PMFERQ.

**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 29.04.2022; одобрена после рецензирования 14.05.2022; принята к публикации 17.05.2022.

The article was submitted 29.04.2022; approved after reviewing 14.05.2022; accepted for publication 17.05.2022.

