

Научная статья  
УДК 621.9.048.6  
EDN: ZGFVII  
DOI: 10.21285/1814-3520-2025-3-308-321



## Влияния исходной микрогеометрии на качество поверхности деталей из алюминиевого сплава АМг6 после ультразвукового поверхностного пластического деформирования

А.В. Иванова<sup>1✉</sup>, А.В. Зеленина<sup>2</sup>, В.П. Гилета<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Резюме.** Цель – изучение влияния исходной микрогеометрии поверхности и количества проходов индентора на микротвердость и шероховатость поверхностного слоя изделий после ультразвукового поверхностного пластического деформирования. Исследование проводилось на цилиндрических образцах из алюминиевого сплава АМг6. Обработка осуществлялась методом ультразвукового поверхностного пластического деформирования по тангенциальной схеме ввода ультразвуковых колебаний и при изменении количества проходов индентора от 1 до 5. Диапазон исходной шероховатости алюминиевых образцов – от  $Ra$  0,44 до  $Ra$  3 мкм. Оценка качества обработанной ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием поверхности осуществлялась на основе измерения параметров шероховатости и микротвердости. Экспериментально установлено, что для выбранного диапазона исходной шероховатости поверхности показатели шероховатости и микротвердости образцов достигают стабильных значений после 1-2 проходов ультразвуковой обработки. Показано, что эффективность ультразвукового поверхностного пластического деформирования деталей из алюминиевого сплава АМг6 в значительной степени определяется микрогеометрическими и физико-механическими характеристиками исходной поверхности и количеством циклов обработки, при этом наблюдается существенное снижение параметров шероховатости и прирост микротвердости в сочетании с формированием специфической ячеистой микрогеометрии поверхности. Установлено, что увеличение количества проходов (более 1-2) не является эффективным способом дальнейшего улучшения качества поверхностного слоя. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологических процессов в машиностроительной, авиационной, автомобильной и других отраслях промышленности, рационализации подбора финишных операций, обеспечения современных требований к качеству обработанной поверхности деталей из алюминиевых сплавов, что позволит повысить экономическую эффективность производства.

**Ключевые слова:** ультразвуковое упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, качество поверхности, шероховатость, микротвердость

**Для цитирования:** Иванова А.В., Зеленина А.В., Гилета В.П. Влияния исходной микрогеометрии на качество поверхности деталей из алюминиевого сплава АМг6 после ультразвукового поверхностного пластического деформирования // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 308–321. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-308-321>. EDN: ZGFVII.

### MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Effects of original microgeometry on the surface quality of AMg6 aluminum alloy parts following ultrasonic surface plastic straining

Alina V. Ivanova<sup>1✉</sup>, Anna V. Zelenina<sup>2</sup>, Viktor P. Gileta<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** We study the effect of original surface microgeometry and the number of indenter passes on the microhardness and roughness of the surface layer of products treated by ultrasonic surface plastic straining. The study was conducted using cylindrical specimens made of AMg6 aluminum alloy. Ultrasonic surface plastic straining was performed according to a tangential input of ultrasonic vibrations for the number of indenter passes varying from 1 to 5. The original roughness of aluminum specimens ranged from  $Ra$  0.44 to  $Ra$  3  $\mu\text{m}$ . The quality of the surface treated by ultrasonic surface plastic straining was assessed based on roughness and microhardness parameters.

For the selected range of original surface roughness, the roughness and microhardness of the specimens reached stable values after 1-2 interender passes. The efficiency of ultrasonic surface plastic straining for products made of AMg6 aluminum alloy is largely determined by the microgeometric and physicommechanical characteristics of the original surface, as well as by the number of processing cycles. Thus, a significant decrease in roughness and increase in microhardness were observed in the formed specific cellular microgeometry of the surface. Increasing the number of passes above 1-2 appears ineffective in terms of further improving the quality of the surface layer. The obtained results can be used to optimize technological processes in mechanical engineering, aviation, automobile, and other industries, optimize the selection of finishing operations, ensure contemporary quality requirements for the processed surface of aluminum alloy products, and increase the economic efficiency of production.

**Keywords:** ultrasonic hardening, surface plastic deformation, surface quality, roughness, microhardness

**For citation:** Ivanova A.V., Zelenina A.V., Gileta V.P. Effects of original microgeometry on the surface quality of AMg6 aluminum alloy parts following ultrasonic surface plastic straining. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):308-321. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-308-321>. EDN: ZGFVII.

## ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование (УЗППД) начинает широко применяться наряду с традиционными методами поверхностного пластического деформирования (ППД), такими как выглаживание и обкатывание [1–10]. Существует множество научных исследований, подтверждающих улучшение параметров качества поверхностного слоя деталей после обработки УЗППД. Наличие колебаний индентора изменяет условия его контактирования с обрабатываемой деталью, обуславливает другой характер напряженно-деформированного состояния материала в очаге деформации и благоприятно влияет на качество поверхности [11–27]. Улучшение микрогеометрических и физико-механических характеристик качества поверхностного слоя после УЗППД позволяет повышать износостойкость, контактную выносливость, усталостную прочность [7, 12–15, 17, 19, 20, 24–27]. Эффективность применения такого перспективного метода финишной обработки, как УЗППД, напрямую зависит не только от режимных параметров, но и от исходного качества поверхностного слоя обрабатываемой детали [12, 14, 15, 17–19, 20–25].

Исследование влияния исходной шероховатости на получаемые после обработки параметры качества поверхностного слоя является важным для оптимизации процесса финишной обработки детали методом УЗППД, а также выбора стратегии подготовки поверхности перед этой обработкой.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на цилиндрических образцах диаметром 50 мм, изготовленных из алюминиевого сплава АМг6, который широко используется в ракетостроении, авиа- и автомобилестроении благодаря низкой плотности и высокой коррозионной стойкости. При этом термическое упрочнение сплава АМг6 считается незначительным, ввиду чего данный сплав классифицируют как не упрочняемый термической обработкой. Поверхность образцов перед УЗППД обрабатывалась точением с различными подачами. В работе использовалось пять серий образцов, отличающихся исходной шероховатостью (табл. 1). Исходная микротвердость образцов до точения составляла 116 HV<sub>50</sub>, микротвердость образцов после точения представлена в табл. 1.

Выбор диапазона исходной шероховатости обусловлен необходимостью изучения влияния УЗППД на свойства поверхности, полученные при различных режимах предшествующей механической обработки – от черновой до тонкой, что соответствует различным стратегиям получения необходимой точности. Этот подход дает возможность оценить эффективность УЗППД в широком диапазоне технологических стратегий подготовки поверхности и позволяет выявить закономерности изменения морфологии, микротвердости и шероховатости в зависимости от исходного микрогеометрического и физико-ме-

**Таблица 1.** Исходное значение шероховатости и микротвердости поверхности образцов

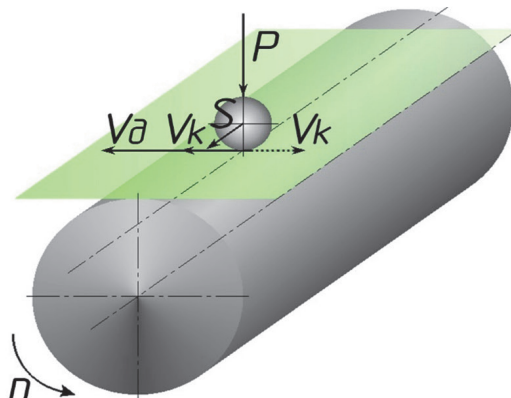
**Table 1.** Base value of sample surface roughness and microhardness

№ серии образцов	1	2	3	4	5
Исходная шероховатость, Ra, мкм	0,44	1,23	1,99	2,34	3,00
Исходная микротвердость, МПа	130	123	125	124	121

ханического состояния поверхности, а также определить оптимальные режимы УЗППД для различных типов предварительной обработки.

Обработка проводилась по тангенциальной схеме ввода ультразвуковых колебаний (рис. 1), при которой вектор колебательной скорости индентора  $V_k$  располагался коллинеарно и компланарно вектору скорости обработки  $V_d$ , а статическое усилие  $P$ , прилагаемое к индентору, направлялось по нормали к оси обрабатываемой детали.

Материал индентора – поликристаллический синтетический алмаз с рабочей частью в форме сферы радиусом 3,5 мм.



**Рис. 1.** Тангенциальная схема ультразвукового поверхностного пластического деформирования  
**Fig. 1.** Tangential scheme of ultrasonic surface plastic deformation

УЗППД осуществлялось на токарном станке 250ИТВМ.01, оснащенный специальным приспособлением, обеспечивающим совпадение линии действия вектора колебательной скорости индентора  $V_k$  и вектора скорости детали  $V_d$ . Источником механических колебаний ультразвуковой частоты служил магнитострикционный преобразователь, подсоединенный к генератору IL10. Усилителем механических колебаний служила стержневая волноводная система.

Количество проходов варьировалось от 1 до 5 при постоянных скоростях обработки  $V_d = 59$  м/мин, подаче  $S = 0,107$  мм/об и статической нагрузке  $P = 50$  Н. Частота колебаний  $f = 19600$  Гц, амплитуда  $A = 13$  мкм.

Параметры шероховатости после проведенных обработок контролировались с помощью контактного профилометра MarSurf PS. Морфология поверхности оценивалась на интерференционном микроскопе белого света Zygo NewView 7300.

Степень изменения шероховатости  $\Delta Ra$  оценивалось по формуле:

$$\Delta Ra = \frac{Ra_{исх}}{Ra},$$

где  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля обработанной поверхности;  $Ra_{исх}$  – исходное среднее арифметическое отклонение профиля.

Микротвердость определялась на микротвердомере ПМТ-3М. Исследование проводилось по методу Виккерса согласно ГОСТ 9450–76<sup>4</sup>. Нагрузка на пирамиду составляла 0,5 Н.

Расчет микротвердости поверхности осуществлялся по формуле:

$$H = 0,189 \frac{P_1}{d_2^2} \cdot 10^2,$$

где  $P_1$  – нагрузка на пирамиду, Н;  $d_2$  – среднеарифметическое длин двух диагоналей отпечатка пирамиды, мм.

<sup>4</sup>ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Введ. 01.01.1977 (изм. в сентябре 1981 г., октябре 1991 г.). М.: Изд-во стандартов, 1992.

Помимо определения микротвердости проводилась оценка степени упрочнения  $\Delta H$  по формуле:

$$\Delta H = \frac{H - H_{исх}}{H_{исх}} \cdot 100\%$$

где  $H$  – микротвердость обработанной поверхности, МПа;  $H_{исх}$  – исходная микротвердость, МПа.

Для обеспечения достоверности полученных результатов измерения параметров поверхности проводились не менее 10 раз на каждом исследуемом участке обработанной поверхности, после чего результаты выборки проходили проверку на наличие подозрительных, выпадающих значений, которые исключались из выборок. За действительное значение величины принималось среднее арифметическое после исключений выпадающих значений.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ**

На рис. 2 представлена морфология поверхности образцов 1 и 5 серий после обработки УЗППД.

Анализ изображений на рис. 2 показывает, что уже после первого прохода происходит сглаживание крупных неровностей, оставшихся после точения, и уменьшение количества исходных микродефектов. Отчетливо прослеживается характерная для УЗППД ячеистая структура поверхности. Видно, что дальнейшее увеличение числа проходов оказывает незначительное влияние на изменение морфологии поверхности. С увеличением количества проходов площадь необработанной УЗППД поверхности постепенно уменьшается, а микрорельеф становится более равномерным и однородным. Формирование ячеистой структуры с малыми размерами ячеек характерно только для УЗППД и обусловлено особенностями кинематики и динамики этого процесса. При УЗППД вектор результирующей скорости  $V_{рез}$  перемещения индентора относительно детали

$$\overline{V_{рез}} = \overline{V_{\delta}} + \overline{V_{\kappa}} + \overline{V_S}$$

Для рассматриваемой в работе схемы УЗППД скалярная величина результирующей скорости

$$V_{рез} = \sqrt{(V_{\delta} + V_{\kappa})^2 + V_S^2},$$

где  $V_{\kappa}$  – колебательная скорость индентора, м/мин;  $V_{\delta}$  – скорость детали, м/мин;  $V_S$  – скорость подачи, мм/мин.

Скорость детали

$$V_{\delta} = \frac{\pi n D}{1000},$$

где  $n$  – число оборотов образца, об/мин;  $D$  – диаметр обрабатываемого образца, мм.

Скорость минутной подачи

$$V_S = S n,$$

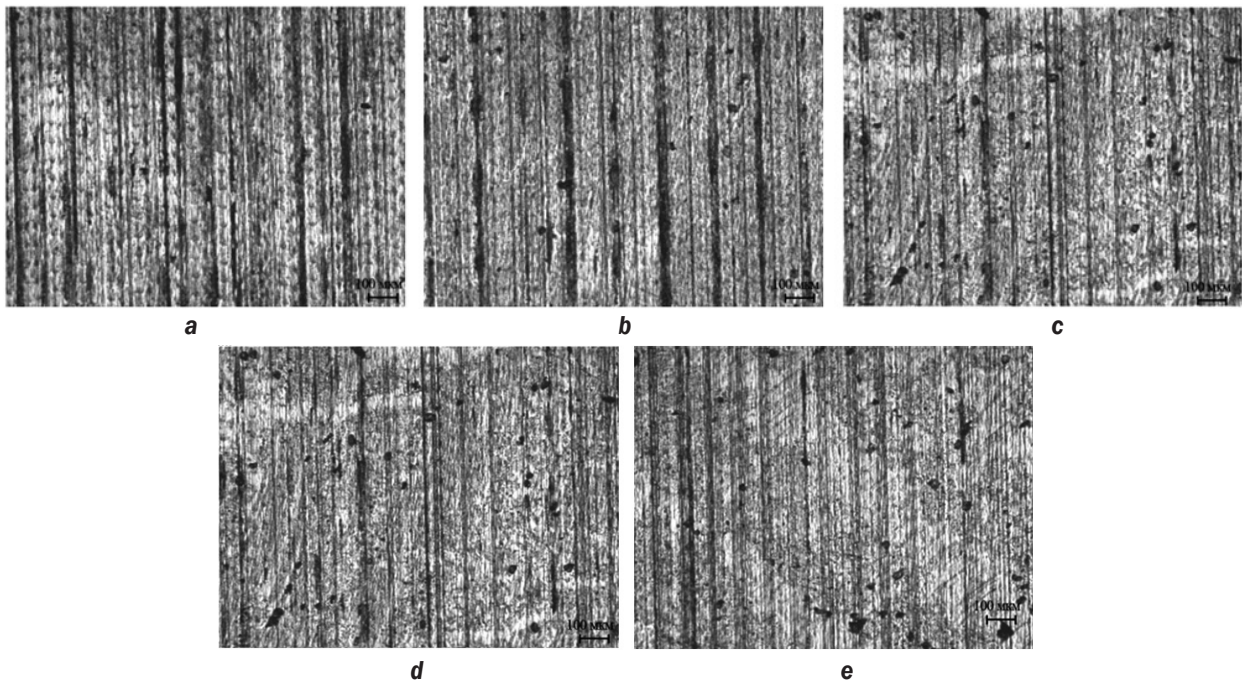
где  $S$  – подача, мм/об.

При гармоническом характере ультразвуковых колебаний, описываемом уравнением:

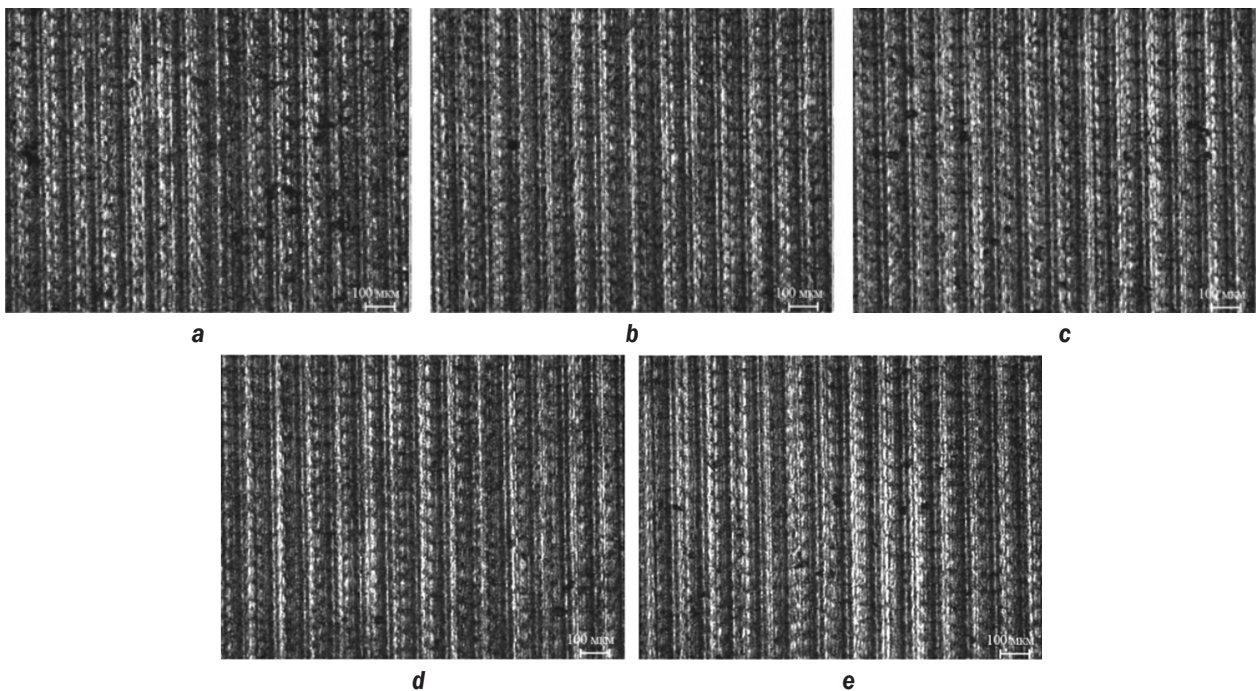
$$A(t) = A_0 \sin(\omega t) = A_0 \sin(2\pi f t).$$



## Образцы 1 серии



## Образцы 5 серии



**Рис. 2.** Морфология обработанных образцов после ультразвукового поверхностного пластического деформирования (a – 1 проход, b – 2 прохода, c – 3 прохода, d – 4 прохода, e – 5 проходов): образцы 1 серии – исходная шероховатость  $R_a = 0,44$  мкм; образцы 5 серии – исходная шероховатость  $R_a = 3,00$  мкм

**Fig. 2.** Morphology of processed samples after ultrasonic surface plastic deformation (a – 1 pass, b – 2 passes, c – 3 passes, d – 4 passes, e – 5 passes): 1<sup>st</sup> series samples – base roughness of  $R_a = 0.44$  μm; 5<sup>th</sup> series samples – base roughness of  $R_a = 3.00$  μm

Колебательная скорость индентора

$$V_{\kappa}(t) = \frac{dA(t)}{dt} = 2\pi f A_0 \cos(2\pi ft),$$

где  $A_0$  – амплитуда колебаний, мкм;  $\omega$  – круговая частота колебаний, рад/с;  $f$  – частота колебаний, с<sup>-1</sup>;  $t$  – время, с.

Тогда с учетом размерностей величина результирующей скорости определяется следующим выражением:

$$V_{рез} = \sqrt{\left(\frac{Sn}{60 \cdot 1000}\right)^2 + \left(\frac{\pi nD}{1000} + 2\pi f \cdot 60 \cdot A_0 \cdot 10^{-6} \cdot \cos(2\pi ft)\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{Sn}{6 \cdot 10^4}\right)^2 + \left(\frac{\pi nD}{1000} + 12\pi f A_0 \cdot 10^{-5} \cdot \cos(2\pi ft)\right)^2},$$

так как величина  $\left(\frac{Sn}{6 \cdot 10^4}\right)^2$  незначительна по сравнению с остальной частью выражения.

Результирующую скорость перемещения индентора относительно детали можно описывать следующим уравнением:

$$V_{рез} = \frac{\pi nD}{1000} + 12\pi f A_0 \cdot 10^{-5} \cdot \cos(2\pi ft).$$

Как видно из этого уравнения, результирующая скорость индентора относительно поверхности детали не является величиной постоянной, а изменяется по гармоническому закону с периодом колебаний  $T = \frac{1}{f}$ .

Графическая зависимость  $V_{рез}$  от времени для применяемых в исследовании режимов обработки представлена на рис. 3.

Из графика зависимости видно, что для выбранных режимов УЗПД результирующая скорость обработки имеет широкий диапазон изменения от -2,02 до 134,46 м/мин и за период колебаний имеет место два противоположных направления выглаживания (изменение направления перемещения индентора относительно обрабатываемой заготовки на противоположное), что и обуславливает формирование специфического микрогеометрического и физико-механического состояния поверхности.

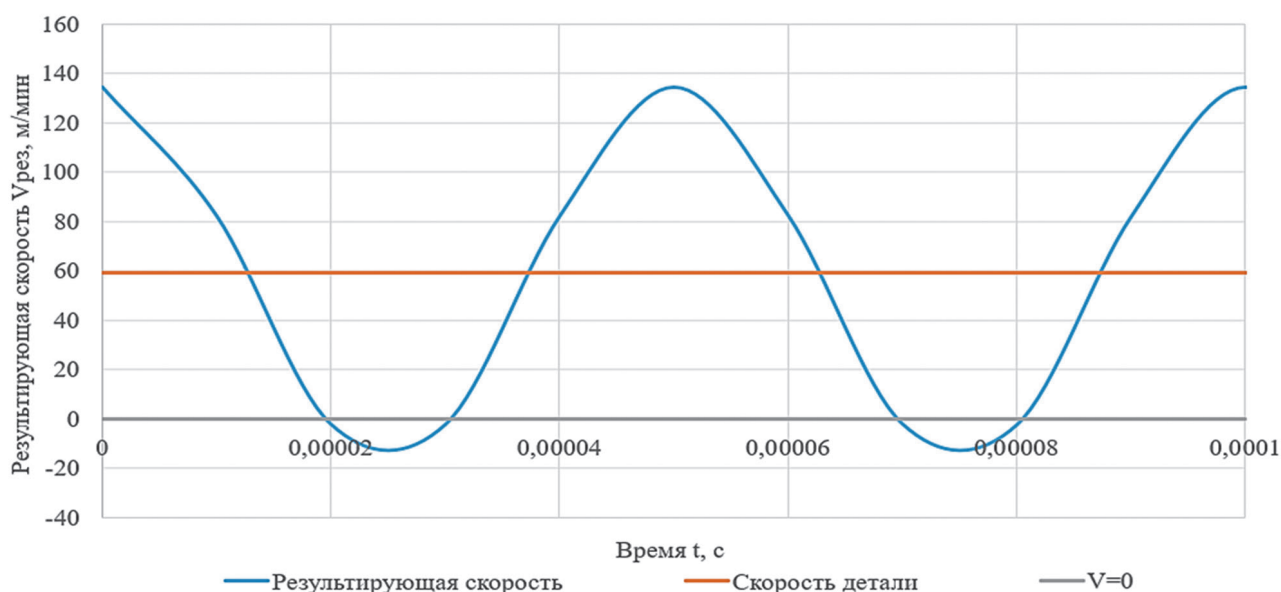
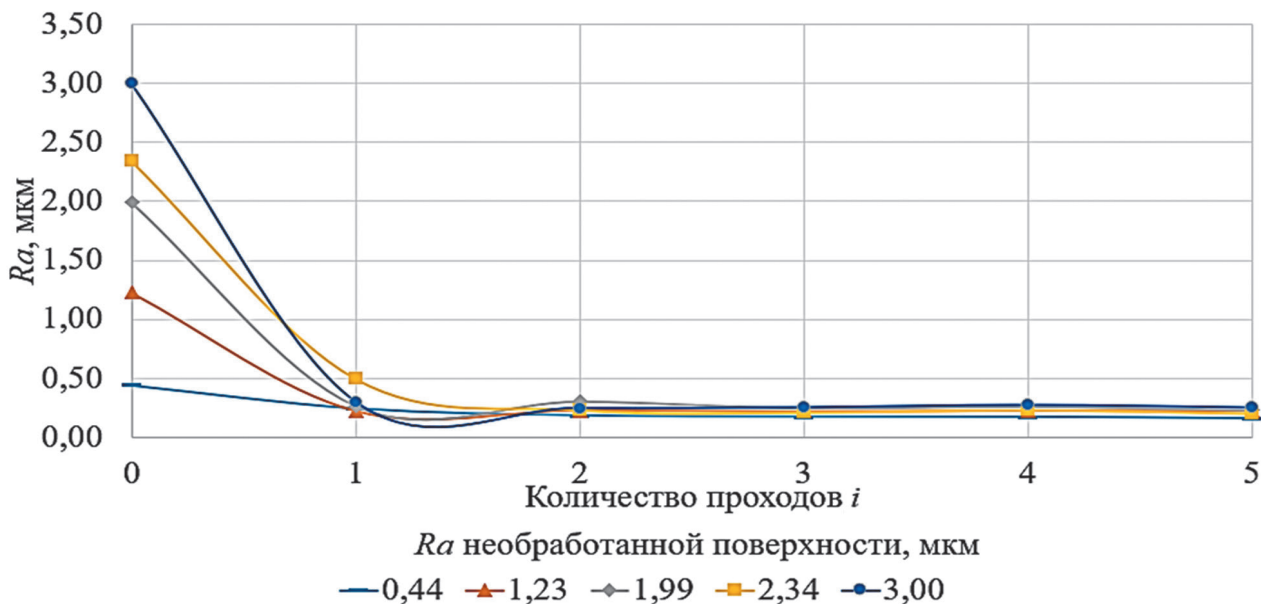


Рис. 3. Изменение результирующей скорости обработки при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании  
 Fig. 3. Resultant processing velocity variation during ultrasonic surface plastic deformation

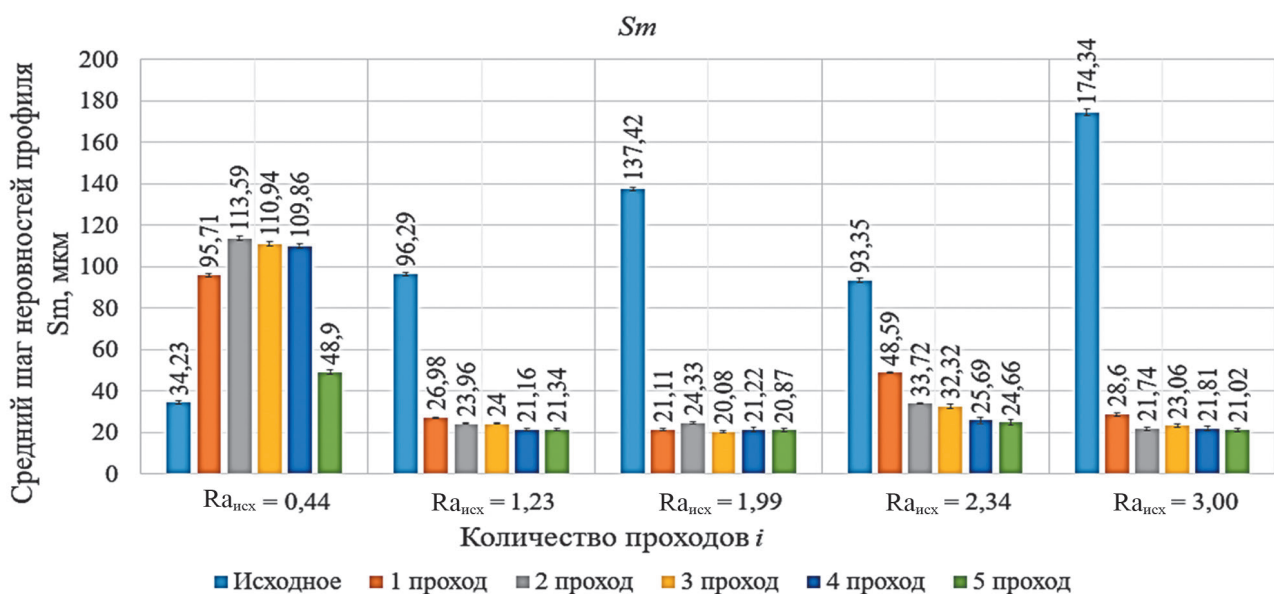
Независимо от значения исходной шероховатости поверхности, УЗППД позволяет достичь существенного снижения значения параметра шероховатости  $Ra$ . Максимальное снижение среднего арифметического отклонения профиля наблюдается после первого прохода (рис. 4). С ростом количества проходов значение параметра  $Ra$  обработанной поверхности существенно не уменьшается. В рассматриваемом диапазоне исходных высот неровностей эффективнее всего значение параметра  $Ra$  уменьшается для линий, соответствующих большим значениям исходной шероховатости поверхности. Это подтверждает интенсификацию процесса пластического течения материала поверхности при сообщении индентору ультразвуковых колебаний [8, 15,16, 22–24, 26, 27].

На графиках (рис. 5, 6) представлены зависимости среднего шага неровностей профиля  $Sm$  и наибольшей высоты профиля  $Rz$  от количества проходов для исследуемых серий образцов с различной исходной шероховатостью поверхности.



**Рис. 4.** Изменение шероховатости после ультразвукового поверхностного пластического деформирования в зависимости от количества проходов индентора

**Fig. 4.** Roughness variation after ultrasonic surface plastic deformation as a function of the number of indenter passes



**Рис. 5.** Зависимость среднего шага неровностей профиля  $Sm$  от количества проходов

**Fig. 5.** Mean spacing of profile irregularities  $Sm$  vs the number of passes



Из графика на рис. 5 видно, что в исходном состоянии значения  $S_m$  значительно отличаются друг от друга, что обусловлено различной исходной шероховатостью поверхностей. В общем случае после первого прохода наблюдается резкое снижение среднего шага неровностей  $S_m$ , что объясняется активным сглаживанием поверхности за счет пластической деформации, приводящей к уменьшению высоты и шага микронеровностей. Однако при самой низкой исходной шероховатости ( $R_a = 0,44$  мкм) происходит увеличение  $S_m$ , а затем его стабилизация. На начальном этапе обработки (при первом проходе индентора) происходит интенсивная пластическая деформация поверхностного слоя материала. В результате этого процесса мелкие неровности исходной поверхности с низкой шероховатостью сглаживаются, а металл активно перераспределяется. Это перераспределение приводит к увеличению среднего расстояния между неровностями  $S_m$ , так как мелкие неровности устраняются, а более крупные (относительно исходного состояния) становятся выраженными.

С ростом числа проходов наблюдается стабилизация значений  $S_m$ , что связано с достижением предела пластичности материала и завершением его перераспределения в поверхностном слое образцов. Дальнейшее уменьшение среднего шага неровностей становится незначительным, так как материал уже подвергся предельному упрочнению, и дальнейшее воздействие не изменяет микрорельеф поверхности.

График на рис. 6 показывает изменение наибольшей высоты профиля в зависимости от количества проходов. В исходном состоянии шероховатость поверхности характеризуется более высоким значением  $R_z$ . После 1–2 проходов наблюдается значительное снижение  $R_z$ , что объясняется интенсификацией процессов пластической деформации, в результате которой происходит существенное сглаживание выступов и уменьшение глубины микровпадин исходного профиля. Дальнейшее увеличение количества проходов приводит к менее эффективному снижению, что связано с достижением предела пластической деформации поверхности.

При этом для образцов с высокой исходной шероховатостью эффект снижения наиболее заметен, так как в начальной стадии УЗППД (1–2 проход) крупные микронеровности подвергаются наиболее интенсивному сглаживанию. После этого процесс стабилизируется, поскольку дальнейшее снижение шероховатости ограничено физико-механическими характеристиками материала.

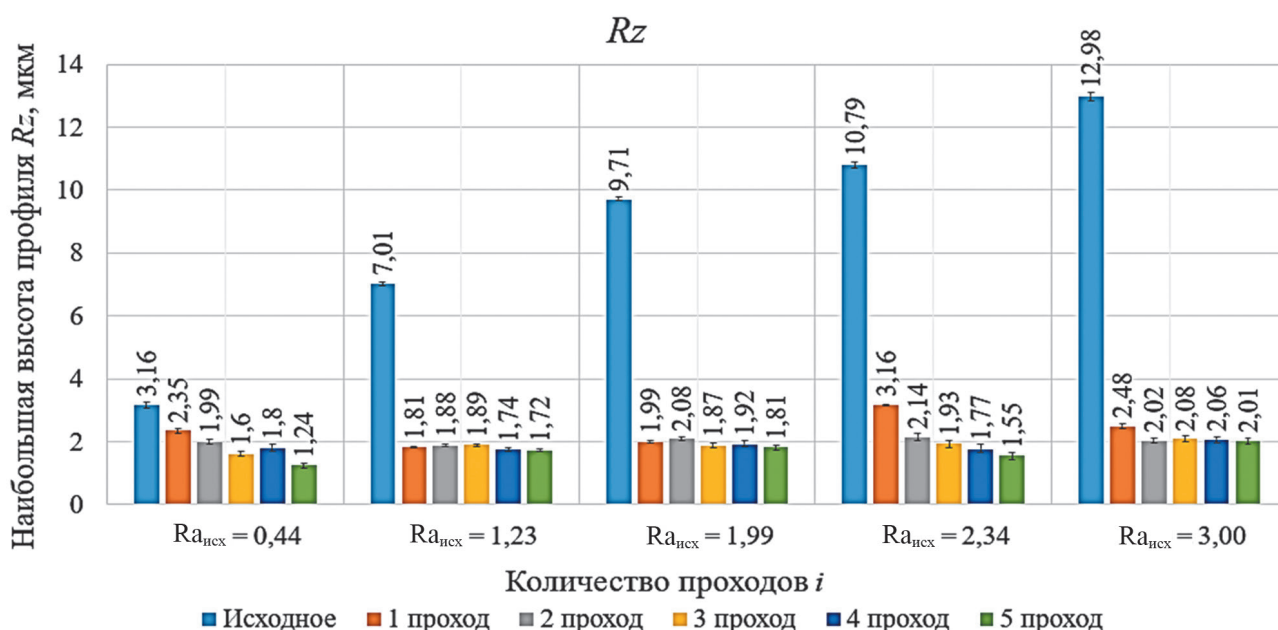


Рис. 6. Зависимость наибольшей высоты профиля  $R_z$  от количества проходов индентора после ультразвукового поверхностного пластического деформирования

Fig. 6. Maximum profile height  $R_z$  vs the number of indenter passes after ultrasonic surface plastic deformation



В табл. 2 представлены значения параметра  $Ra$  и степени изменения шероховатости в зависимости от исходной и количества проходов после УЗППД.

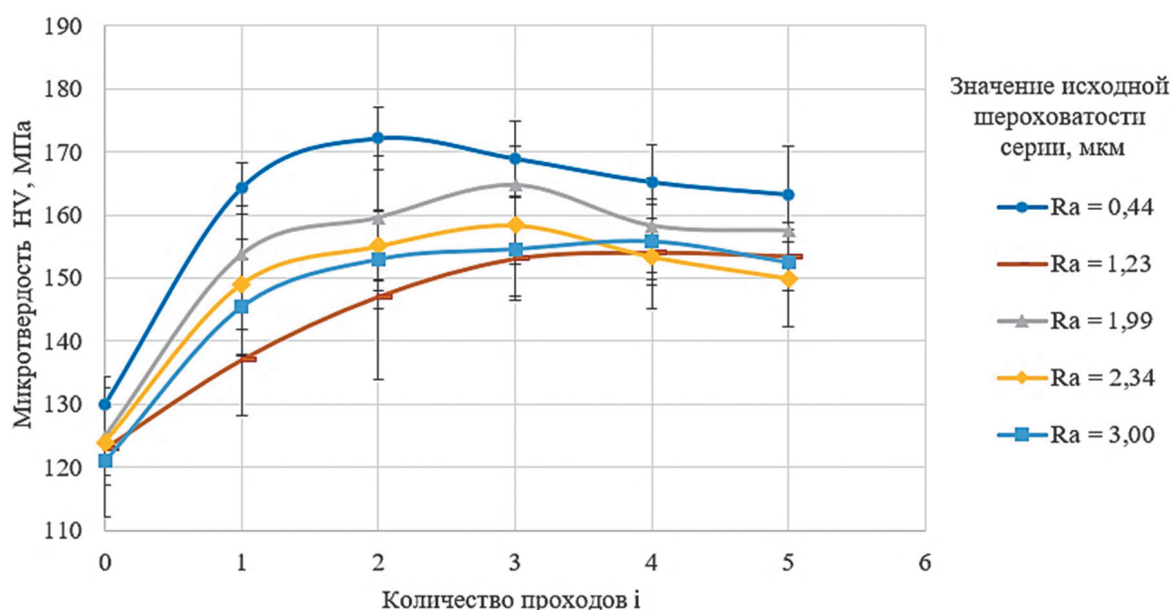
Исходя из данных табл. 2, можно сказать, что чем выше исходное значение  $Ra_{исх}$  необработанной поверхности, тем сильнее эффект УЗППД, то есть выше степень снижения  $\Delta Ra$ . Для используемого в исследовании диапазона исходных шероховатостей и режимов обработки максимальная степень снижения достигает 12 раз (для исходной шероховатости  $Ra_{исх} = 3$  мкм). Рациональное количество числа проходов – 1–2, так как дальнейшее увеличение их числа не приводит к существенному снижению шероховатости по параметру  $Ra$ .

Изменение микротвердости поверхности после обработки УЗППД показано на рис. 7.

Как видно из графика, количество проходов также оказывает влияние и на микротвердость поверхностного слоя образцов, обработанных методом УЗППД изделий. Наибольший градиент роста микротвердости наблюдается после первого прохода. В общем случае, с учетом доверительных интервалов, достижение наибольшего значения микротвердости происходит после 2–3 проходов, при этом видно, что для линии, соответствующей самой гладкой исходной поверхности, максимальное значение микротвердости достигается после 2 прохода, а для более высоких исходных значений шероховатости – после 3 прохода, после чего происходит ее незначительное снижение и последующая стабилизация.

**Таблица 2.** Зависимость степени изменения шероховатости  $\Delta Ra$  от числа проходов индентора  
**Table 2.** Dependence of the roughness variation degree  $\Delta Ra$  on the number of indenter passes

Кол-во проходов $i$	$Ra$ , мкм									
	Номер серии образцов									
	1		2		3		4		5	
	$Ra_{исх} = 0,44$	$\Delta Ra$	$Ra_{исх} = 1,23$	$\Delta Ra$	$Ra_{исх} = 1,99$	$\Delta Ra$	$Ra_{исх} = 2,34$	$\Delta Ra$	$Ra_{исх} = 3,00$	$\Delta Ra$
1	0,24	1,83	0,22	5,59	0,27	7,37	0,49	4,78	0,30	10,00
2	0,18	2,44	0,23	5,35	0,30	6,63	0,23	10,17	0,25	12,00
3	0,17	2,59	0,22	5,59	0,25	7,96	0,21	11,14	0,25	12,00
4	0,17	2,59	0,22	5,59	0,26	7,65	0,23	10,17	0,27	11,11
5	0,16	2,75	0,22	5,59	0,23	8,65	0,20	11,70	0,25	12,00



**Рис. 7.** Зависимость микротвердости поверхности после ультразвукового поверхностного пластического деформирования от исходной шероховатости и количества проходов

**Fig. 7.** Surface microhardness after ultrasonic surface deformation vs base roughness and number of passes

В табл. 3 представлены данные по изменению степени упрочнения обработанной поверхности после УЗППД в зависимости от исходной шероховатости поверхности и от количества проходов.

**Таблица 3.** Зависимость микротвердости и прироста микротвердости от количества проходов при различной исходной шероховатости поверхности

**Table 3.** Dependence of microhardness and microhardness increase on the number of passes with different base surface roughness

Количество проходов <i>i</i>	Микротвердость HV, МПа									
	№ серии образцов									
	1		2		3		4		5	
	$H_{исх} = 130$	$\Delta H(1), \%$	$H_{исх} = 123$	$\Delta H(2), \%$	$H_{исх} = 125$	$\Delta H(3), \%$	$H_{исх} = 124$	$\Delta H(4), \%$	$H_{исх} = 121$	$\Delta H(5), \%$
<b>1</b>	164	26,2	133	8,1	154	23,2	149	20,2	145	19,8
<b>2</b>	172	32,3	141	14,6	160	28,0	155	25,0	153	26,4
<b>3</b>	169	30,0	161	30,9	165	32,0	158	27,4	155	28,1
<b>4</b>	165	26,9	155	26,0	158	26,4	153	23,4	156	28,9
<b>5</b>	163	25,4	153	24,4	158	26,4	150	21,0	153	26,4

Степень упрочнения также зависит от исходного состояния поверхности, которое формируется на предшествующих операциях. С увеличением значения параметра  $Ra$  исходной поверхности максимально достигаемое значение микротвердости после обработки методом УЗППД, как правило, снижается. Данную закономерность можно объяснить тем, что микротвердость предварительно подготовленной (методом точения) поверхности с малой шероховатостью выше, что, вероятно, обусловлено проявлением технологической наследственности при подготовке поверхности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы: ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование приводит к значительному снижению шероховатости и увеличению микротвердости поверхности образцов из материала АМг6, что в большинстве случаев может положительно влиять на такие эксплуатационные характеристики изделий, как износостойкость и усталостная прочность.

Исходная шероховатость поверхности оказывает влияние на эффективность УЗППД: с увеличением исходной шероховатости эффективность снижения шероховатости возрастает, то есть чем выше исходное значение  $Ra$  необработанной поверхности, тем сильнее эффект УЗППД (выше степень снижения  $\Delta Ra$ ).

Оптимальное количество проходов для достижения большей микротвердости и малой шероховатости составляет 1–2, дальнейшее увеличение количества проходов не приводит к значительному снижению шероховатости и росту микротвердости, а в некоторых случаях может ухудшить показатели из-за возникновения явления перенаклепа поверхностного слоя. С учетом исходной шероховатости наиболее целесообразной является коррекция режимов обработки, обеспечивающая наилучшее сочетание параметров качества поверхности, чем осуществление многопроходной обработки.

Учет исходного состояния поверхности позволяет рационализировать процесс обработки и достичь наилучших возможных результатов как по качеству поверхностного слоя, так и по производительности процесса. Полученные результаты могут быть использованы для разработки процесса УЗППД алюминиевых сплавов, при выборе оптимальных параметров упрочнения, а также стратегии проведения предшествующих операций, что позволит более эффективно улучшать качество поверхности и повышать эксплуатационные характеристики изделий.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кувшинов М.О., Хлыбов А.А. Сравнительный анализ методов поверхностного пластического деформирования (ППД) // Уральская школа молодых металлургов: матер. XVIII Междунар. науч.-техн. Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых (г. Екатеринбург, 21–23 ноября 2017 г.). Екатеринбург: УРФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. С. 37–42. EDN: YRSFDW.
2. Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Argirov Ya., Todorov V., et al. Effects of heat treatment and severe surface plastic deformation on mechanical characteristics, fatigue, and wear of Cu-10Al-5Fe bronze // *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 24. P. 8905. <https://doi.org/10.3390/ma15248905>.
3. Brostow W., Czechowski K., Polowski W., Rusek P., Toboła D., Wronska I. Slide diamond burnishing of tool steels with adhesive coatings and diffusion layers // *Materials Research Innovations*. 2013. Vol. 17. Iss. 4. P. 269–277. <https://doi.org/10.1179/1433075X12Y.0000000060>.
4. Uddin M., Santifoller R., Hall C., Schlaefter T. Effect of combined grinding–burnishing process on surface integrity, tribological, and corrosion performance of laser-clad Stellite 21 alloys // *Advanced Engineering Materials*. 2022. Vol. 25. Iss. 8. P. 2201332. <https://doi.org/10.1002/adem.202201332>.
5. Santos V., Uddin M., Hall C. Mechanical surface treatments for controlling surface integrity and corrosion resistance of Mg alloy implants: a review // *Journal of Functional Biomaterials*. 2023. Vol. 14. Iss. 5. P. 242. <https://doi.org/10.3390/jfb14050242>.
6. Ferencsik V., Varga G. The influence of diamond burnishing process parameters on surface roughness of low-alloyed aluminium workpieces // *Machines*. 2022. Vol. 10. Iss. 7. P. 564. <https://doi.org/10.3390/machines10070564>.
7. Schubnell J., Farajian M. Fatigue improvement of aluminium welds by means of deep rolling and diamond burnishing // *Welding in the World*. 2022. Vol. 66. No. 4. P. 699–708. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01212-1>.
8. Nestler A., Schubert A. Effect of machining parameters on surface properties in slide diamond burnishing of aluminium matrix composites // *Materials Today: Proceedings*. 2015. Vol. 2-1. P. S156–S161. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.033>.
9. Varga G., Ferencsik V. Investigation of the effect of surface burnishing on stress condition and hardening phenomena // *Tehnički vjesnik*. 2022. Vol. 29. No. 4. P. 1247–1253. <https://doi.org/10.17559/TV-20211110171854>.
10. Xiong Qiwen, Zhang Po, Zhai Wenzheng, Luo Xiaoshuang, Cai Zhaobing, Zheng Feilong, et al. Effect of ultrasonic surface rolling on the fretting wear property of 7075 aluminum alloy // *Metals*. 2023. Vol. 13. Iss. 10. P. 1674. <https://doi.org/10.3390/met13101674>.
11. Velázquez-Corral E., Wagner V., Jerez-Mesa R., Lluma J., Travieso-Rodríguez J.A., Dessein G. Analysis of ultrasonic vibration-assisted ball burnishing process on the tribological behavior of AISI 316L cylindrical specimens // *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 16. P. 5595. <https://doi.org/10.3390/ma16165595>.
12. Tao Jiahao, Zhang Xin, Huang Lianpeng, Wang Hao, Zhang Yuanhu, Wang Zehua, et al. Microstructure and property evolutions of Q345B steel during ultrasonic shot peening // *Crystals*. 2023. Vol. 13. Iss. 2. P. 299. <https://doi.org/10.3390/cryst13020299>.
13. Ma Xiguan, Zhang Weihai, Xu Shubo, Sun Kangwei, Hu Xinzhi, Ren Guocheng, et al. Effect of ultrasonic surface rolling process on surface properties and microstructure of 6061 aluminum alloy // *Materials Research*. 2023. Vol. 26. Iss. 9-10. P. e20230322. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2023-0322>.
14. John M., Ralls A.M., Dooley S.C., Thazhathidathil A.K.V., Perka A.K., Kuruveri U.B., et al. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 22. P. 10986. <https://doi.org/10.3390/app112210986>.
15. Kishore A., John M., Ralls A.M., Jose S.A., Kuruveri U.B., Menezes P.L. Ultrasonic nanocrystal surface modification: processes, characterization, properties, and applications // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. Iss. 9. P. 1415. <https://doi.org/10.3390/nano12091415>.
16. Fernández-Osete I., Estevez-Urra A., Velázquez-Corral E., Valentin D., Llumà J., Jerez-Mesa R., et al. Ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool for a lathe characterized by acoustic emission and vibratory measurements // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 19. P. 5746. <https://doi.org/10.3390/ma14195746>.
17. Teimouri R., Amini S., Bami A.B. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6 // *Measurement*. 2018. Vol. 116. P. 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.001>.
18. Velázquez-Corral E., Llumà J., Jerez-Mesa R., Wagner V., Dessein G., Travieso-Rodríguez J.A. Fatigue enhancement and hardening effect through ultrasonic vibration-assisted ball-burnishing process on AISI 1045 steel // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2024. Vol. 47. Iss. 1. P. 203–219. <https://doi.org/10.1111/ffe.14180>.
19. Biffi C.A., Bassani P., Nematollahi M., Moghaddam N.S., Amerinatanzi A., Mahtabi M.J., et al. Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on the microstructure and martensitic transformation of selective laser melted nitinol // *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 19. P. 3068. <https://doi.org/10.3390/ma12193068>.
20. Salmi M., Huuki J., Ituarte I.F. The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface made by additive manufacturing // *Progress in Additive Manufacturing*. 2017. Vol. 2. Iss. 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0017-z>.

21. Kumar S., Kumar D., Singh I., Rath D. An insight into ultrasonic vibration assisted conventional manufacturing processes: a comprehensive review // *Advances in Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 14. Iss. 6. P. 168781322211078. <https://doi.org/10.1177/16878132221107812>.
22. Ровин С.Л., Дикун А.О. Исследование влияния ультразвуковой обработки в процессе кристаллизации на структуру и свойства деформируемых алюминиевых сплавов // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-28-35>. EDN: UPCUPD.
23. John M., Ralls A.M., Dooley S.C., Thazhathidathil A.K.V., Perka A.K., Kuruveri U.B., et al. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 22. P. 10986. <https://doi.org/10.3390/app112210986>.
24. John M., Kalvala P.R., Misra M., Menezes P.L. Peening techniques for surface modification: processes, properties, and applications // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 14. P. 3841. <https://doi.org/10.3390/ma14143841>.
25. Xu Nan, Jiang Xiaochen, Shen Xuehui, Peng Hao. Improving the surface integrity and tribological behavior of a high-temperature friction surface via the synergy of laser cladding and ultrasonic burnishing // *Lubricants*. 2023. Vol. 11. Iss. 9. P. 379. <https://doi.org/10.3390/lubricants11090379>.
26. Fu Lei, Li Xiulan, Lin Li, Wang Zhengguo, Zhang Yingqian, Luo Yunrong, et al. Study on microstructure evolution mechanism of gradient structure surface of AA7075 aluminum alloy by ultrasonic surface rolling treatment // *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 16. P. 5616. <https://doi.org/10.3390/ma16165616>.

### References

1. Kuvshinov M.O., Khlybov A.A. Comparative analysis of the methods of surface plastic deformation. In: *Ural'skaya shkola molodyh metalloedov: materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy Ural'skoj shkoly-seminara metalloedov – molodyh uchenyh = Ural school of young metallurgists: Proceedings of 18<sup>th</sup> International scientific and technical Ural school-seminar of metallurgists – young scientists*. 21–23 November 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 2017, p. 37-42. (In Russ.). EDN: YRSFDW.
2. Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Argirov Ya., Todorov V., et al. Effects of heat treatment and severe surface plastic deformation on mechanical characteristics, fatigue, and wear of Cu-10Al-5Fe bronze. *Materials*. 2022;15(24):8905. <https://doi.org/10.3390/ma15248905>.
3. Brostow W., Czechowski K., Polowski W., Rusek P., Toboła D., Wronska I. Slide diamond burnishing of tool steels with adhesive coatings and diffusion layers. *Materials Research Innovations*. 2013;17(4):269-277. <https://doi.org/10.1179/1433075X12Y.0000000060>.
4. Uddin M., Santifoller R., Hall C., Schlaefel T. Effect of combined grinding–burnishing process on surface integrity, tribological, and corrosion performance of laser-clad Stellite 21 alloys. *Advanced Engineering Materials*. 2022;25(8):2201332. <https://doi.org/10.1002/adem.202201332>.
5. Santos V., Uddin M., Hall C. Mechanical surface treatments for controlling surface integrity and corrosion resistance of Mg alloy implants: a review. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023;14(5):242. <https://doi.org/10.3390/jfb14050242>.
6. Ferencsik V., Varga G. The influence of diamond burnishing process parameters on surface roughness of low-alloyed aluminium workpieces. *Machines*. 2022;10(7):564. <https://doi.org/10.3390/machines10070564>.
7. Schubnell J., Farajian M. Fatigue improvement of aluminium welds by means of deep rolling and diamond burnishing. *Welding in the World*. 2022;66(4):699-708. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01212-1>.
8. Nestler A., Schubert A. Effect of machining parameters on surface properties in slide diamond burnishing of aluminium matrix composites. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2-1:S156-S161. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.033>.
9. Varga G., Ferencsik V. Investigation of the effect of surface burnishing on stress condition and hardening phenomena. *Tehnički vjesnik*. 2022;29(4):1247-1253. <https://doi.org/10.17559/TV-2021110171854>.
10. Xiong Qiwen, Zhang Po, Zhai Wenzheng, Luo Xiaoshuang, Cai Zhaobing, Zheng Feilong, et al. Effect of ultrasonic surface rolling on the fretting wear property of 7075 aluminum alloy. *Metals*. 2023;13(10):1674. <https://doi.org/10.3390/met13101674>.
11. Velázquez-Corral E., Wagner V., Jerez-Mesa R., Lluma J., Travieso-Rodríguez J.A., Dessein G. Analysis of ultrasonic vibration-assisted ball burnishing process on the tribological behavior of AISI 316L cylindrical specimens. *Materials*. 2023;16(16):5595. <https://doi.org/10.3390/ma16165595>.
12. Tao Jiahao, Zhang Xin, Huang Lianpeng, Wang Hao, Zhang Yuanhu, Wang Zehua, et al. Microstructure and property evolutions of Q345B steel during ultrasonic shot peening. *Crystals*. 2023;13(2):299. <https://doi.org/10.3390/cryst13020299>.
13. Ma Xiguan, Zhang Weihai, Xu Shubo, Sun Kangwei, Hu Xinzhi, Ren Guocheng, et al. Effect of ultrasonic surface rolling process on surface properties and microstructure of 6061 aluminum alloy. *Materials Research*. 2023;26(9-10):e20230322. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2023-0322>.
14. John M., Ralls A.M., Dooley S.C., Thazhathidathil A.K.V., Perka A.K., Kuruveri U.B., et al. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10986. <https://doi.org/10.3390/app112210986>.



15. Kishore A., John M., Ralls A.M., Jose S.A., Kuruveri U.B., Menezes P.L. Ultrasonic nanocrystal surface modification: processes, characterization, properties, and applications. *Nanomaterials*. 2022;12(9):1415. <https://doi.org/10.3390/nano12091415>.
16. Fernández-Osete I., Estevez-Urra A., Velázquez-Corral E., Valentin D., Llumà J., Jerez-Mesa R., et al. Ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool for a lathe characterized by acoustic emission and vibratory measurements. *Materials*. 2021;14(19):5746. <https://doi.org/10.3390/ma14195746>.
17. Teimouri R., Amini S., Bami A.B. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6. *Measurement*. 2018;116:129-139. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.001>.
18. Velázquez-Corral E., Llumà J., Jerez-Mesa R., Wagner V., Dessein G., Travieso-Rodriguez J.A. Fatigue enhancement and hardening effect through ultrasonic vibration-assisted ball-burnishing process on AISI 1045 steel. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2024;47(1):203-219. <https://doi.org/10.1111/ffe.14180>.
19. Biffi C.A., Bassani P., Nematollahi M., Moghaddam N.S., Amerinatanzi A., Mahtabi M.J., et al. Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on the microstructure and martensitic transformation of selective laser melted nitinol. *Materials*. 2019;12(19):3068. <https://doi.org/10.3390/ma12193068>.
20. Salmi M., Huuki J., Ituarte I.F. The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface made by additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*. 2017;2(1):31-41. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0017-z>.
21. Kumar S., Kumar D., Singh I., Rath D. An insight into ultrasonic vibration assisted conventional manufacturing processes: a comprehensive review. *Advances in Mechanical Engineering*. 2022;14(6):168781322211078. <https://doi.org/10.1177/16878132221107812>.
22. Rovin S.L., Dikun A.O. Investigation of the effect of ultrasonic treatment during crystallization on the structure and properties of deformable aluminum alloys. *Foundry production and metallurgy*. 2023;(3):28-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-28-35>. EDN: UPCUPD.
23. John M., Ralls A.M., Dooley S.C., Thazhathidathil A.K.V., Perka A.K., Kuruveri U.B., et al. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10986. <https://doi.org/10.3390/app112210986>.
24. John M., Kalvala P.R., Misra M., Menezes P.L. Peening techniques for surface modification: processes, properties, and applications. *Materials*. 2021;14(14):3841. <https://doi.org/10.3390/ma14143841>.
25. Xu Nan, Jiang Xiaochen, Shen Xuehui, Peng Hao. Improving the surface integrity and tribological behavior of a high-temperature friction surface via the synergy of laser cladding and ultrasonic burnishing. *Lubricants*. 2023;11(9):379. <https://doi.org/10.3390/lubricants11090379>.
26. Fu Lei, Li Xiulan, Lin Li, Wang Zhengguo, Zhang Yingqian, Luo Yunrong, et al. Study on microstructure evolution mechanism of gradient structure surface of AA7075 aluminum alloy by ultrasonic surface rolling treatment. *Materials*. 2023;16(16):5616. <https://doi.org/10.3390/ma16165616>.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ****INFORMATION ABOUT THE AUTHORS****Иванова Алина Владиславовна,**

аспирант,

Новосибирский государственный  
технический университет,

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия

✉ a.v.ivanova.2018@corp.nstu.ru

**Alina V. Ivanova,**

Postgraduate Student,

Novosibirsk State Technical University,

20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia

✉ a.v.ivanova.2018@corp.nstu.ru

**Зеленина Анна Владимировна,**

аспирант,

Новосибирский государственный  
технический университет,

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия

zelenina.2018@corp.nstu.ru

**Anna V. Zelenina,**

Postgraduate Student,

Novosibirsk State Technical University,

20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia

zelenina.2018@corp.nstu.ru

**Гилета Виктор Павлович,**

к.т.н., доцент,

доцент кафедры технологии машиностроения,

Новосибирский государственный  
технический университет,

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия

v.gileta@corp.nstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6195-3919>**Viktor P. Gileta,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,

Associate Professor of the Department of

Mechanical Engineering Technology,

Novosibirsk State Technical University,

20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia

v.gileta@corp.nstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6195-3919>

**Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 20.05.2025 г.; одобрена после рецензирования 07.07.2025 г.; принята к публикации 22.07.2025 г.

**Authors' contribution**

The authors contributed equally to this article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Information about the article**

The article was submitted 20.05.2025; approved after reviewing 07.07.2025; accepted for publication 22.07.2025.