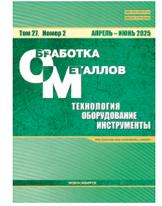


НГТУ



НЭТИ

# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

 Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)


## Сравнение методов ультразвуковой обработки поверхностей, полученных послойным синтезом, на примере сплава Ti6Al4V

Сергей Сундуков<sup>a, \*</sup>, Равиль Нигметзянов<sup>b</sup>, Вячеслав Приходько<sup>c</sup>,  
 Дмитрий Фатюхин<sup>d</sup>, Владимир Кольдюшов<sup>e</sup>

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>, [sergey-lefmo@yandex.ru](mailto:sergey-lefmo@yandex.ru); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0008-1443-7584>, [lefmo@yandex.ru](mailto:lefmo@yandex.ru);  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8261-0424>, [prikhodko@madi.ru](mailto:prikhodko@madi.ru); <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>, [mitriy2@yandex.ru](mailto:mitriy2@yandex.ru);  
<sup>e</sup> <https://orcid.org/0009-0005-6711-6256>, [v.koldyushov@list.ru](mailto:v.koldyushov@list.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 534-8 + 621.9.048.6

#### История статьи:

Поступила: 30 января 2025  
 Рецензирование: 17 февраля 2025  
 Принята к печати: 17 марта 2025  
 Доступно онлайн: 15 июня 2025

#### Ключевые слова:

Ультразвуковая обработка  
 Кавитация  
 Абразив  
 Поверхностное деформирование  
 Селективное лазерное плавление  
 Шероховатость  
 Сферические дефекты

#### Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00463, <https://rscf.ru/project/24-19-00463/>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Метод селективного лазерного плавления порошков металлов позволяет изготавливать детали любой формы, что недоступно традиционным технологиям. Главными недостатками метода являются высокая шероховатость поверхности, обусловленная разбрызгиванием металла, сферондизацией, частичным оплавлением и прилипанием порошка, а также сложности с финишной обработкой сложнопрофильных участков поверхности. Одним из эффективных способов, позволяющих производить обработку таких изделий, является применение ультразвуковых жидкостных технологий, где рабочими телами служат кавитационные пузырьки, проникающие в любые участки поверхности и совершающие там работу. **Цель работы:** определение влияния различных видов ультразвуковой обработки на свойства поверхности, полученной методом селективного лазерного плавления, путем проведения сравнительных испытаний. **В работе исследованы** образцы из титанового сплава Ti6Al4V, изготовленные методом селективного лазерного плавления на станке EOS M280. **Методика исследований.** Для ультразвуковой обработки применялась стержневая магнитострикционная колебательная система, торец излучателя которой располагался на расстоянии 20 мм от боковой поверхности образца. В качестве жидкой среды использовался травильный раствор (3% HF + 5% HNO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O) для удаления оксидной плёнки, препятствующей воздействию кавитации. Проводилась кавитационно-эрозионная обработка (КЭО), кавитационно-абразивная обработка (КАО), а также дополнительно проводилось ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование (ППД). У всех образцов после обработки оценивалось состояние поверхности, шероховатость и субмикрорельеф, у образцов после ППД дополнительно исследовалась микроструктура. **Результаты и обсуждение.** Методом высокоскоростной съемки проведено сравнение основных механизмов воздействия на поверхность при КЭО и КАО. Так, при КЭО это схлопывающиеся и пульсирующие кавитационные кластеры, располагающиеся в местах наибольших выступов и впадин поверхности, а при КАО к ним добавляется микрорежущее действие абразивных частиц, которые воспринимают ударные волны, возникающие при схлопывании пузырьков, ударяются о поверхность, совершают колебательные, вращательные и продольные движения. В результате сравнения динамики изменения состояния поверхности установлено, что КЭО позволяет полностью удалить дефекты поверхности до дорожек расплава; при КАО часть дефектов поверхности удаляется, а оставшиеся деформируются; при ультразвуковом ППД сферические дефекты сминаются, образуя большие плоские участки. Все виды ультразвуковой обработки снижают шероховатость поверхности: при КЭО *Ra* снижается на 33 %, при КАО – на 43 %, при ультразвуковом ППД – на 52 %, но при этом *Rmax* меньше всего при КАО. Микроструктура после ППД характеризуется упрочнённым слоем глубиной примерно 100 мкм и увеличением микротвёрдости до 35 %. При этом после ППД в поверхностном слое образуются дефекты в виде трещин, частично деформированных сфер и заметно наличие необработанных глубоких впадин поверхностей, что значительно снижает эксплуатационные свойства, поэтому перед ППД целесообразно проводить КЭО или КАО для удаления дефектов поверхности.

**Для цитирования:** Сравнение методов ультразвуковой обработки поверхностей, полученных послойным синтезом, на примере сплава Ti6Al4V / С.К. Сундуков, Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько, Д.С. Фатюхин, В.К. Кольдюшов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 6–28. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-6-28.

## Введение

Производство методом послойного синтеза позволяет изготавливать детали практически любой формы и соответственно снизить металлоёмкость производства, уменьшить вес конструкций и заменить ответственные процессы

#### \*Адрес для переписки

Сундуков Сергей Константинович, к.т.н., доцент  
 Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
 Ленинградский проспект, 64,  
 125319, г. Москва, Россия  
 Тел.: +7 926 369-19-70, e-mail: [sergey-lefmo@yandex.ru](mailto:sergey-lefmo@yandex.ru)

сборки соединений на их изготовление целиком за одну операцию [1–3].

Перечисленные преимущества делают производство по аддитивным технологиям одной из самых быстроразвивающихся отраслей промышленности, что выражается в ежегодном росте доли применения аддитивных деталей относительно полученных по традиционным технологиям [4, 5].

Для машиностроения наибольший интерес представляют технологии, позволяющие изготавливать металлические изделия из порошка, к которым относятся селективное лазерное спекание SLP и селективное лазерное плавление SLM.

Производство данными методами имеет ряд значительных недостатков [6–8]:

- низкую производительность;
- высокие требования к гранулометрическому составу порошков металлов;
- необходимость печати поддерживающих элементов, которые затем необходимо удалять;
- необходимость удаления нерасплавленного порошка, что исключает возможность изготовления полых деталей с замкнутым контуром;
- образование пор внутри детали;
- различия механических свойств детали в параллельном и перпендикулярном направлениях относительно слоёв детали;
- высокую шероховатость получаемых поверхностей, что при несоответствии заданной требует дополнительной обработки, которая может быть недоступна для участков со сложной геометрией.

Поскольку качество поверхностного слоя во многом определяет эксплуатационные свойства изделия в целом, то именно высокая шероховатость является основным фактором, препятствующим более широкому применению аддитивных технологий [9].

Независимо от химического состава сплавляемого металла для селективного лазерного плавления шероховатость поверхности формируется в результате воздействия следующих факторов [10–15]:

- разбрызгивания металла из ванны расплава;
- сфероидизации жидкого металла под действием сил поверхностного натяжения при удалении пучка лазера от зоны расплавления;
- не полностью расплавленных частичек порошка, обладающих различной адгезией к поверхности;

– нерасплавленных частиц порошка, прилипших к поверхности;

– наличия границ между отдельными слоями, которые вызваны различной степенью расплавления частиц порошка, располагающихся по границам каждого слоя.

Другая значительная проблема аддитивного производства – это высокая вероятность появления пор внутри изделия, что значительно снижает прочностные свойства изделия, особенно если поры находятся близко к поверхности.

Вопросы обработки таких изделий являются актуальными и находят отражение во многих научных работах, в которых предлагаются такие способы, как лазерное оплавление поверхностей [16], изостатическое прессование (в первую очередь оно применяется для уплотнения материала) [17, 18], различные виды химического воздействия [19, 20], нанесение покрытий [21] и поверхностно-пластическое деформирование (ППД) [22].

Недостатки перечисленных способов заключаются в том, что они не обеспечивают возможность обработки сложнопрофильных поверхностей. Для этой цели одним из наиболее эффективных методов является применение ультразвуковой жидкостной обработки [23, 24]. В этом случае рабочими телами служат кавитационные пузырьки, способные проникать в любые участки поверхности и осуществлять работу по их изменению [25, 26].

В современных исследованиях по данной тематике рассматриваются два вида ультразвуковой жидкостной обработки [27–37]: кавитационно-эрозионная (КЭО) и кавитационно-абразивная (КАО).

Результатами во всех исследованиях стало снижение различных параметров шероховатости и изменение морфологии обрабатываемой поверхности, выраженное в уменьшении количества дефектов на поверхности. При этом результаты очень разнятся и достигаются при различных параметрах обработки: время – от одной минуты до нескольких часов, а амплитуды ультразвуковых колебаний – от 5 до 80 мкм. Лучшие результаты достигаются при КАО, когда расстояние между торцом излучателя и обрабатываемой поверхностью составляет 1...2 мм, что является, по сути, размерной обработкой и не может применяться для обработки сложно-

профильных деталей, или при КЭО и КАО, совмещённых с электрохимическим полированием на высоких амплитудах колебаний 60...80 мкм. Эти колебания вызывают значительный нагрев электролита, что в свою очередь ускоряет химические реакции и затрудняет оценку вклада ультразвука в получаемый эффект.

Ряд работ посвящён ультразвуковому ППД [38–47], которое приводит к существенному снижению шероховатости поверхности, ее упрочнению и способствует закрытию пор в приповерхностном слое. Недостатком данного способа являются сложности и ограничения при обработке сложнопрофильных поверхностей, связанные с невозможностью подведения индентора ультразвуковой колебательной системы в труднодоступные места.

Таким образом, требуется проведение дополнительных исследований для более подробного изучения влияния различных видов ультразвуковой обработки на свойства поверхностей, полученных аддитивными технологиями, и оптимизация режимов с целью обработки сложнопрофильных изделий.

Исходя из вышесказанного, *целью работы* является определение влияния различных видов ультразвуковой обработки на свойства поверхности, полученной методом селективного лазерного плавления, путем проведения сравнительных испытаний.

Для достижения цели поставлены следующие *задачи исследований*:

- анализ основных механизмов воздействия при ультразвуковых методах обработки (КЭО, КАО, ППД);
- исследование динамики изменения поверхности при данных методах;
- исследование микро- и субмикрорегии обработанной поверхности;
- исследование микроструктуры поперечного микрошлифа после ультразвукового ППД.

## Методика исследований

### Материал и изготовление образцов

Образцы для проведения экспериментальных исследований представляли собой кубики размерами 10×10×10 мм, изготовленные методом селективного лазерного плавления порошка титанового сплава Ti6Al4V, имеющего следующий химический состав (табл. 1).

Выбор данного материала для исследований обусловлен тем, что он широко применяется в аэрокосмическом машиностроении, где производство деталей сложной формы особенно перспективно, и при этом после SLM на его поверхности имеются ярко выраженные дефекты, описанные выше.

Изготовление образцов производилось в институте СТАНКИН, на кафедре «Высокоэффективные технологии обработки», на станке EOS M280 из порошка диаметром 40 мкм при мощности пучка лазера 200 Вт и скорости сканирования 1100 мм/с.

В качестве исследуемой поверхности выбрана боковая, так как именно она образует сложнопрофильные элементы. На рис. 1, а представлена фотография состояния поверхности после производства, на рис. 1, б – поперечный микрошлиф с указанием дефектов.

Всего было изготовлено 25 образцов: 5 контрольных и по 5 для рассматриваемых видов обработки. Схемы обработки приведены на рис. 2 и 4.

Рельеф поверхности в основном представляет собой последовательность сфер различного диаметра, одна часть из которых является следствием сфероидизации, а другая – частично расплавленным порошком или частицами нерасплавленного порошка, прилипшими к поверхности при кристаллизации крайних дорожек расплава.

Наиболее сложными из рассмотренных дефектов с точки зрения дальнейшей обработки

Таблица 1

Table 1

**Химический состав порошка Ti6Al4V**  
**Chemical composition of Ti-6Al 4V powder**

Элемент / Element	Ti	Al	V	Fe	Zr	Остальное / Bal.
Содержание, % / Content, %	89,72	5,3	3,7	0,17	0,04	≈ 1

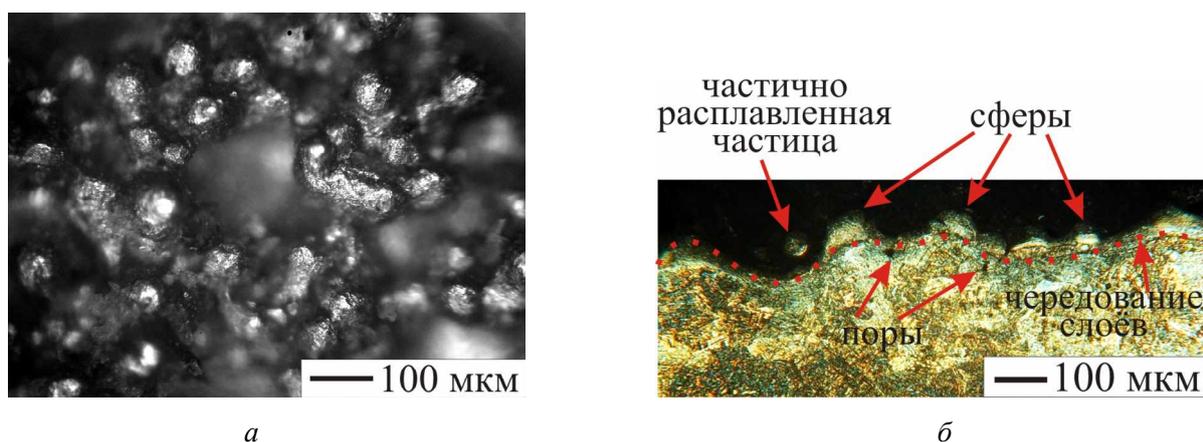


Рис. 1. Фотографии состояния боковой поверхности образцов:  
*a* – вид сверху; *б* – поперечный микрошлиф

Fig. 1. Images showing the condition of the samples side surface:  
*a* – top view; *б* – cross-sectional micrographic image

для снижения шероховатости являются дефекты сфероидизации, поскольку такие сферы образуются из расплавленных дорожек жидкого металла и после кристаллизации они фактически становятся частью поверхности.

#### Схемы проведения ультразвуковой обработки и применяемое оборудование

Для изменения состояния поверхности применялись ультразвуковые КЭО, КАО и ППД.

Предварительные эксперименты по проведению жидкостных процессов КЭО и КАО образцов из Ti6Al4V показали, что вследствие наличия на поверхности прочной оксидной пленки данный сплав имеет высокую кавитационную стойкость, в результате даже при достаточно длительной ультразвуковой обработке (1 час) с поверхности было удалено лишь незначительное количество частиц порошка, обладающих

низкой адгезией, что не оказывает влияния на общее состояние поверхности. Поэтому обработка проводилась в травильном растворе, состоящем из плавиковой и азотной кислоты, а также дистиллированной воды (3 % HF + 5 % HNO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O), по схемам, представленным на рис. 2. Для сравнения эффективности воздействия ультразвука проводилась химическая обработка в травильном растворе (ХО) без введения ультразвуковых колебаний (рис. 2, *a*).

ХО осуществлялось путем погружения образца в травильный раствор на 30 мин. Каждые 10 мин образец вытаскивался, промывался 1 мин под проточной водой, сушился и протирался этиловым спиртом. Далее с помощью микроскопа выполнялось фотографирование боковой поверхности.

Совмещенные процессы КЭО + ХО и КАО + ХО проводились при введении в жидкость

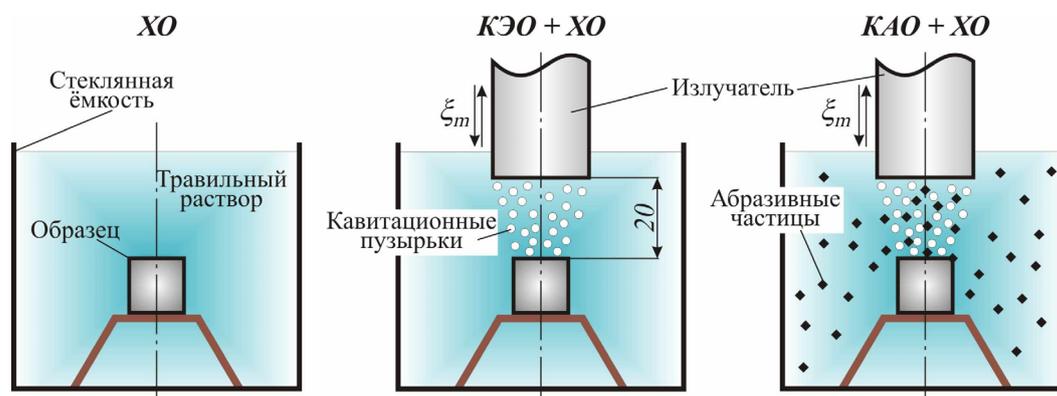


Рис. 2. Схемы обработки

Fig. 2. Schematic diagrams of treatment

излучателя ультразвуковой стержневой колебательной системы ПМС 2,0/22, состоящей из магнестрикционного преобразователя, представляющего собой пакет О-образных пластин из пермендюра, и припаянного к нему волновода из титанового сплава. Излучатель, изготовленный из ВТ-3, имел диаметр излучающей поверхности 30 мм. Расстояние между торцом излучателя и обрабатываемой поверхностью образца составляло 20 мм.

Питание колебательной системы осуществлялось ультразвуковым генератором УЗГ 2,0/22. Резонансная частота колебаний  $f = 19\,750$  Гц, амплитуда колебаний  $\xi_m = 20$  мкм. При таком режиме обработки потребляемая генератором мощность составила примерно 600 Вт.

Амплитуда колебаний 20 мкм соответствует высокоамплитудному режиму обработки, при котором помимо кавитационных пузырьков значительный вклад в процесс обработки вносят крупномасштабные акустические течения, направленные от торца излучателя к поверхности образца. При выбранных условиях эксперимента сила течения образуемых потоков превышает силу тяжести абразивных частиц, что обеспечивает их непрерывную циркуляцию в озвучиваемом объеме и возврат в зону кавитационной обработки.

В качестве абразива использовался порошок карбида бора  $B_4C$  (рис. 3), имеющий высокую твердость и устойчивость к химическому воздействию.

Порошок абразива насыпался до уровня выше обрабатываемой поверхности, объемная концентрация при этом составила 20 %. После включения ультразвука под действием потоков абразив распределялся по объему.



Рис. 3. Частицы карбида бора

Fig. 3. Boron carbide particles

Для минимизации эффекта нагрева при ультразвуковой обработке стеклянная емкость с травильным раствором помещалась в большую емкость с водой комнатной температуры (20 °С).

С периодичностью 1...3 мин обработка прерывалась для фотографирования изменений поверхностей.

Ультразвуковое ППД осуществлялось путем прижима торца колебательной системы к образцу под собственным весом  $P = 70$  Н (рис. 4).

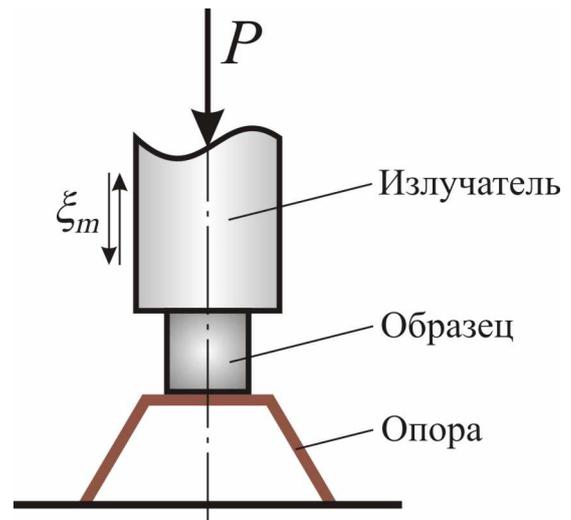


Рис. 4. Схема ультразвукового ППД

Fig. 4. Scheme of ultrasonic surface plastic deformation

Обработка проводилась в течение 10 с при фотографировании поверхности каждые 2 с.

#### **Сравнение механизмов обработки поверхности при КЭО и КАО**

Для сравнения механизмов воздействия на поверхность при КЭО и КАО производилась высокоскоростная съемка процессов обработки металлической пластины в воде, также расположенной на расстоянии 20 мм от торца излучателя.

Съемка осуществлялась на камеру Fastec Нисрес, позволяющую записывать видеофрагменты с частотой от 500 до 112 000 кадров в секунду.

Для анализа картины перемещений кавитационных пузырьков и абразивных частиц по обрабатываемой поверхности в данной работе снимались видеофрагменты со скоростью 5339 кадров в секунду при размере снимаемой области 3,4×3,3 мм.

Далее с помощью специального программного обеспечения, поставляемого изготовителем

высокоскоростной камеры, производилась покадровая обработка полученных видеофрагментов.

Результаты представлены в виде последовательности кадров от момента включения ультразвука. Время, указанное в правом верхнем углу каждого кадра, определялось как отношение номера кадра  $N$  от момента включения ультразвука к скорости съёмки ( $t = N/5339$ ).

### Исследование структуры и шероховатости поверхности

При проведении всех вышеуказанных видов обработки выполнялась фотосъёмка боковой поверхности образцов с использованием металлографического микроскопа МЕТАМ-РВ-22.

После ультразвукового ППД дополнительно исследовался поперечный микрошлиф, изготовленный из образца, для анализа изменения микроструктуры в результате упрочнения.

По достижении времени обработки, после которого не происходит значительных изменений поверхности, на профилометре модели 130 производилось измерение параметров шерохо-

ватости с получением рельефа в виде профилеграмм. За результаты брались средние значения из пяти измерений высотных параметров шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ .

Изменения субмикроскометрии поверхностей после обработки оценивались методом атомно-силовой микроскопии на сканирующем мультимикроскопе СММ-2000 при использовании кантилевера MSCT с жесткостью балки 0,1 Н/м.

Микротвердость измерялась по методу Виккерса на приборе ПМТ-3 путем вдавливания алмазной пирамиды с нагружением 50 г в течение 10 с.

### Результаты и их обсуждение

#### Сравнение механизмов КЭО и КАО поверхности

На рис. 5 представлена кинограмма процесса КЭО.

В момент включения ультразвука жидкость оказывается под переменным воздействием сжимающих и растягивающих сил, соответ-

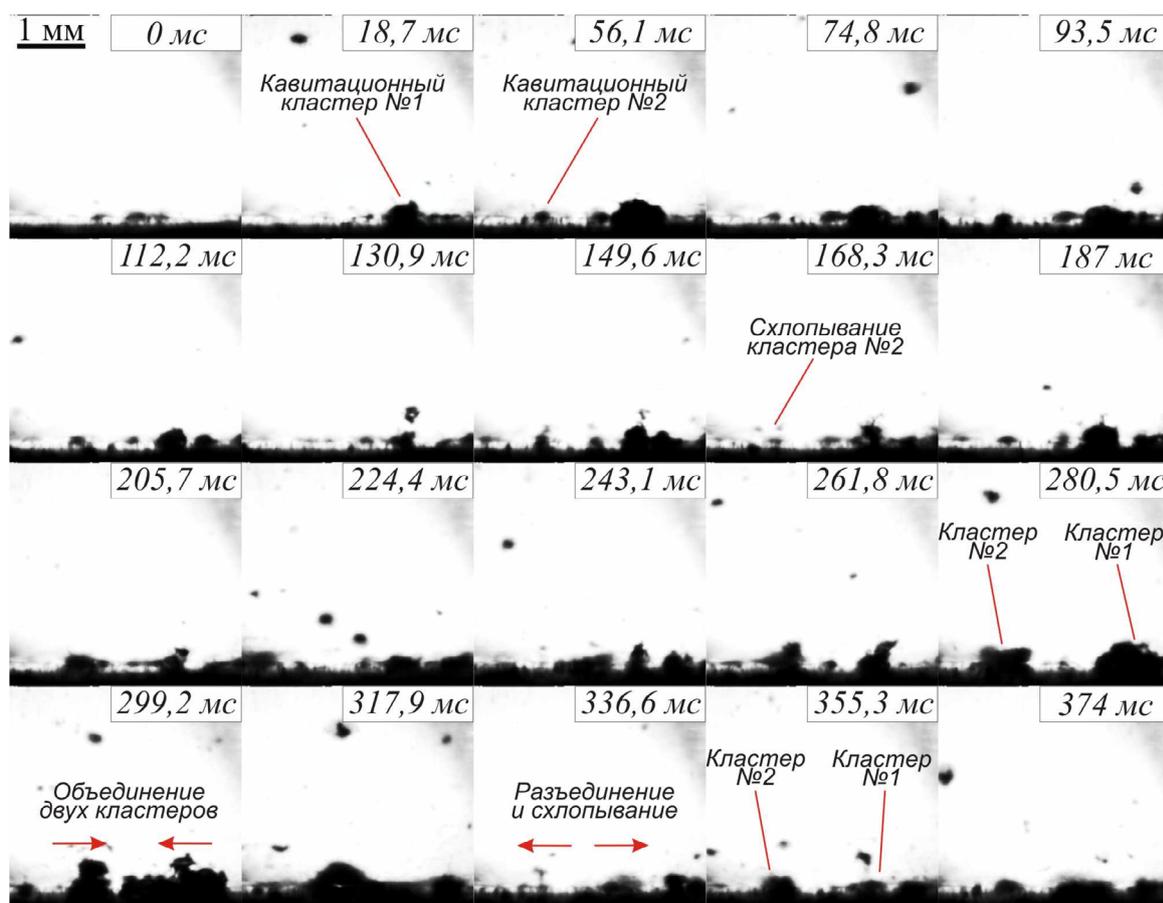


Рис. 5. Кинограмма процесса КЭО (скорость съёмки 5339 кадров/с)

Fig. 5. CET process cinematography (frame rate: 5,339 fps)

ствующих фазам колебаний торца излучателя. В результате разрывов сплошности жидкости образуются кавитационные пузырьки, которые осциллируют, схлопываются, объединяются и перемещаются в обрабатываемом объеме под действием акустических потоков. Наиболее благоприятным местом для образования и скопления пузырьков являются различные неоднородности поверхности, например выступы и впадины микрорельефа.

На первом кадре показано образование кавитационных пузырьков на обрабатываемой поверхности. Этот процесс начинается раньше, чем пузырьки, образованные под излучателем, будут туда перенесены акустическим потоком. С течением времени количество пузырьков увеличивается, они объединяются около наибольшей неровности поверхности, образуя кавитационный кластер. Аналогично на поверхности в различное время образуются другие кластеры. На кадрах показано образование и часть жизненного цикла двух кавитационных кластеров, которые пульсируют, затягивают в себя кавитационные пузырьки, переносимые

акустическим потоком, схлопываются и образуются заново.

На кадре, соответствующем 168 мс обработки, показано схлопывание кластера № 2, на следующем кадре (187 мс) он начинает зарождаться на том же месте и достигает своего максимального размера к 280,5 мс. На отметке 299,2 мс два кластера начинают объединяться, затем объединенный кластер частично схлопывается, а оставшаяся часть пузырьков разъединяется на две (336,6 мс), которые возвращаются на прежние места и начинают снова расти (355,3–374 мс).

В итоге основным механизмом КЭО является схлопывание и пульсация кавитационных пузырьков в местах наибольших неровностей поверхности. С точки зрения обработки аддитивных изделий это, с одной стороны, способствует удалению дефектов поверхности, а с другой – приводит к увеличению глубины впадин микрорельефа.

При КАО (рис. 6) в момент включения ультразвука на поверхности, покрытой слоем абразива, также образуются кавитационные кластеры,

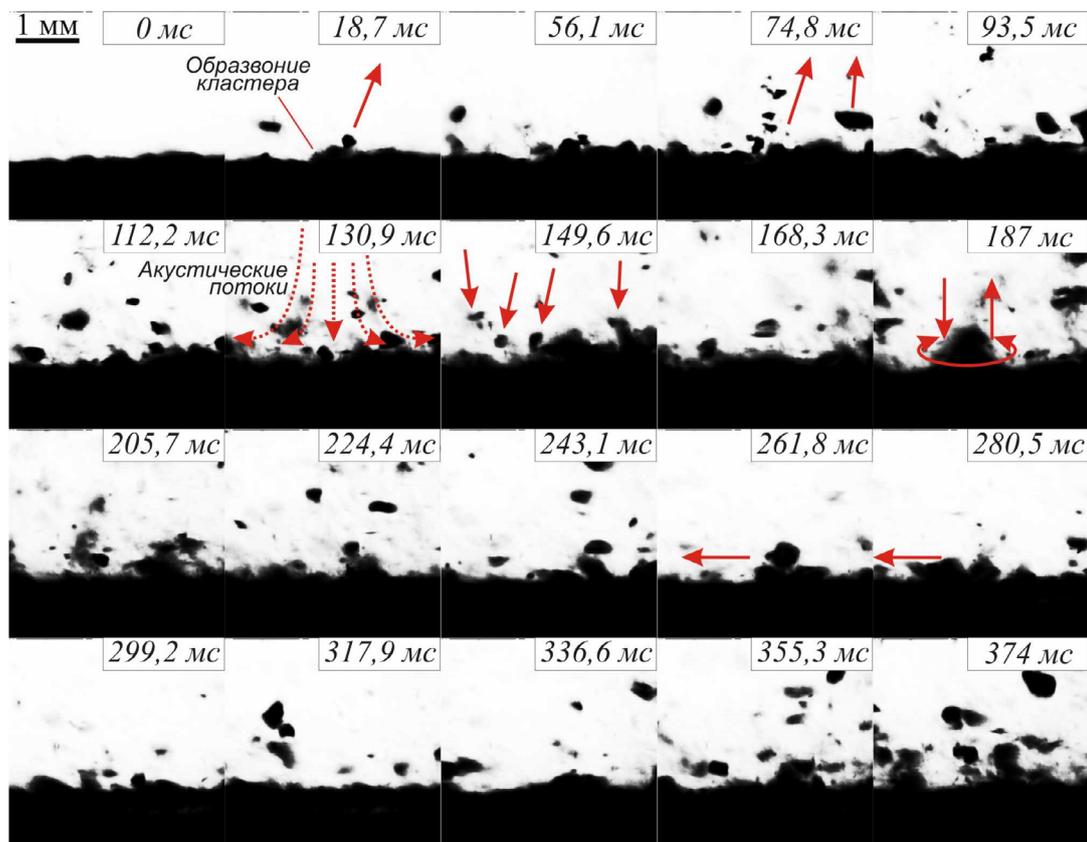


Рис. 6. Кинограмма процесса КАО (скорость съемки 5339 кадров/с)

Fig. 6. Cinemagram of the cavitation-abrasive treatment process (shooting speed 5339 fps)

пульсация которых приводит к отрыву частичек абразива (0–18,7 мс). С ростом кластеров процесс усиливается и большинство абразивных частиц отделяются от поверхности (56,1–112,2 мс). К этому моменту акустический поток и переносимые им кавитационные пузырьки от излучателя достигают области обработки (130,9 мс), увлекают за собой абразивные частицы и переносят их обратно к поверхности. При этом оказывается ударное воздействие, определяющееся скоростью движения абразива. Она может быть равна скорости потока или значительно увеличиваться при схлопывании пузырька рядом с абразивной частицей, которая воспринимает на себя импульс возникающей ударной волны (кадры с 149,6 мс).

После удара о поверхность значительное количество частиц попадают в поле действия кластеров, где колеблются вместе с ними, вращаются (187 мс), ударяются о поверхность при схлопывании кластера, перемещаются вдоль поверхности (261,8–280,5 мс). Во всех случаях на поверхность оказывается микрорежущее действие со стороны абразивных частиц, которое изменяет микрорельеф.

В моменты, когда мощность уходящего в стороны акустического потока превышает действующие силы на абразивную частицу, она уносится в сторону, потом опять же акустическим

потоком возвращается под торец излучателя, откуда переносится к поверхности, где производит работу по микрорезанию.

На кадрах 355,3–374 мс в большей степени проявляется совместное воздействие кавитационных кластеров и абразивных частиц.

Таким образом, при добавлении в жидкость абразива обеспечивается равномерное воздействие по всем участкам поверхности в результате совместного действия кавитационных кластеров и абразивных частиц.

### *Динамика изменения поверхностного слоя при различных видах обработки*

При ХО в травильном растворе сначала удаляется оксидная плёнка, после чего травильный раствор начинает взаимодействовать со сплавом и с малой скоростью растворять контактирующие участки поверхности (рис. 7).

В процессе ХО происходит уменьшение размеров сфер, размываются границы в скоплениях сфер, что приводит к образованию площадок большего размера. С увеличением времени ХО такие площадки частично объединяются, образуя большие. При этом одновременно происходит травление впадин неровностей поверхности, которые на фотографиях представляют собой нефокусированные участки.

При введении в раствор ультразвуковых колебаний динамика обработки полностью изменяется (рис. 8). Кавитационные кластеры образуются и совершают работу в местах наибольших неровностей поверхности.

При схлопывании пузырьков в кластерах возникают ударные волны и кумулятивные струи, что сопровождается мгновенными давлениями и температурами, которые достигают 700 МПа и 4000 °С соответственно [48–49]. В результате накопительного действия от этих эффектов происходит пластическая деформация обрабатываемой поверхности [50, 51]. В случае КЭО + ХО мгновенные высокие температуры дополнительно приводят к значительной интенсификации химической реакции в местах схлопывания пузырьков.

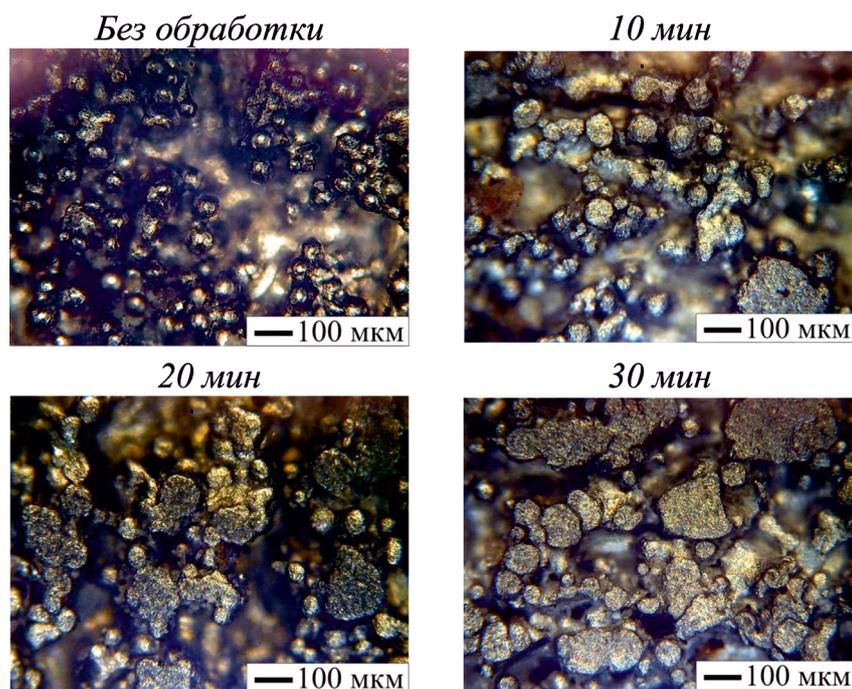


Рис. 7. Динамика изменения поверхности в процессе ХО

Fig. 7. Dynamics of surface changes during chemical treatment process

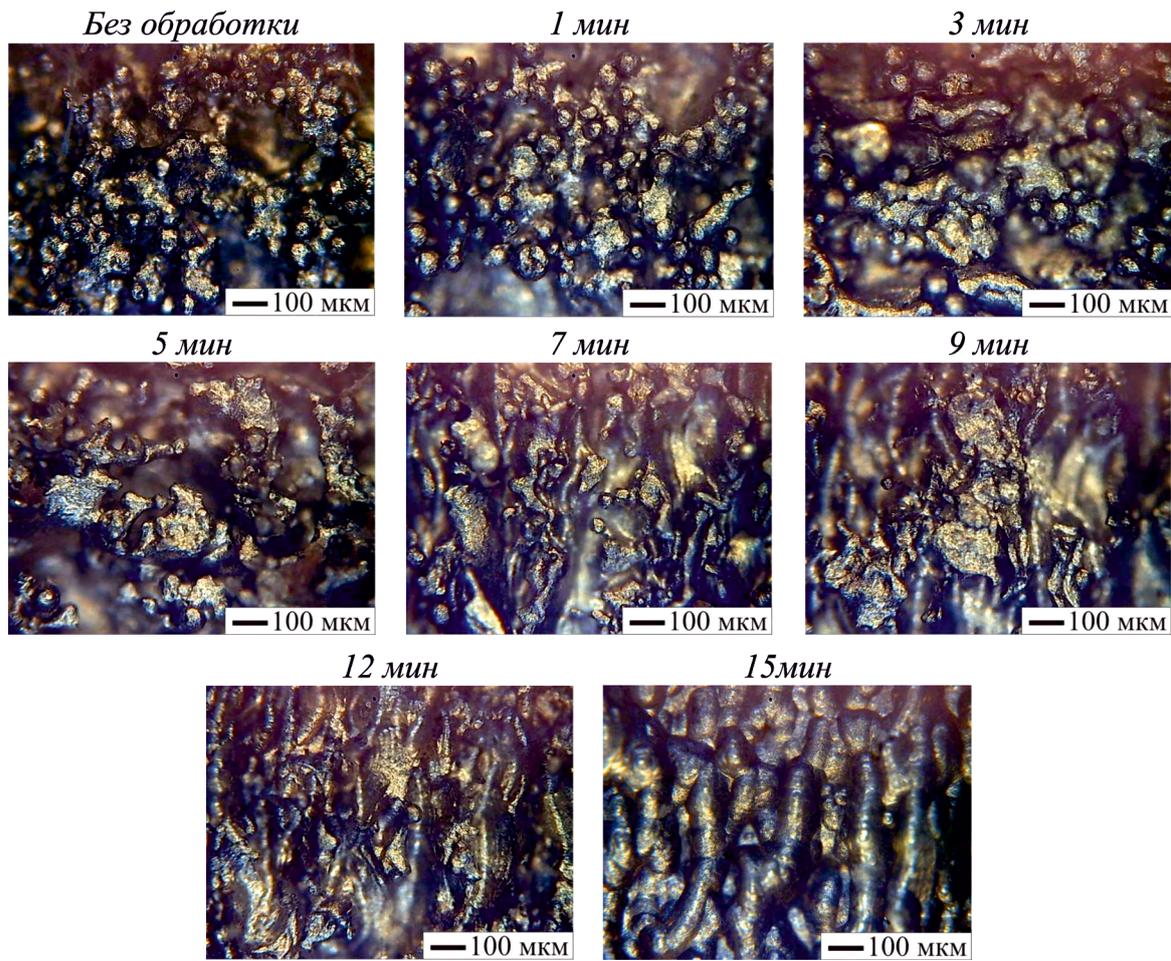


Рис. 8. Динамика изменения поверхности в процессе КЭО + ХО  
 Fig. 8. Dynamics of surface changes during CET + Chemical treatment

В результате уже после 3 мин обработки получаемая поверхность схожа с поверхностью, обработанной ХО в течение 20 мин, т. е. процесс ускоряется практически в 7 раз.

Главным отличием КЭО + ХО является то, что с увеличением времени обработки происходит уменьшение количества выступов неровностей и на каждой последующей фотографии увеличивается несфокусированная зона, т. е. происходит удаление дефектов поверхности. Начиная с 7 мин обработки отчётливо заметна часть поверхности, представляющая собой чередование дорожек расплавления порошка. При 15 мин обработки с поверхности полностью удаляются дефекты в виде брызг металла и сфер.

Добавление абразивных частиц при КАО также изменяет характер обработки (рис. 9).

В данном случае большая часть энергии, образующаяся при схлопывании пузырька, передаётся абразивным частицам, которые, ударяясь

о поверхность, осуществляют микрорезание. В результате перераспределения энергии характер обработки изменяется на преимущественно механическую абразивную.

Через 1 мин обработки происходит удаление значительной части сфер; эффект образования площадок, как при ХО и КЭО + ХО, практически незаметен. Это говорит о том, что за счет ударов абразива сначала производится удаление дефектов, обладающих слабой адгезией. Далее действие КАО + ХО заключается в том, что за счёт ХО происходит травление дефектов, уменьшается прочность их сцепления с поверхностью, после чего ударом абразива они удаляются. Дефекты, имеющие высокую прочность сцепления и в основном являющиеся результатом сфероидизации, при ударах абразива деформируются, что приводит к уменьшению высоты неровностей рельефа.

В итоге после 10 мин обработки поверхность представляет собой совокупность значительно

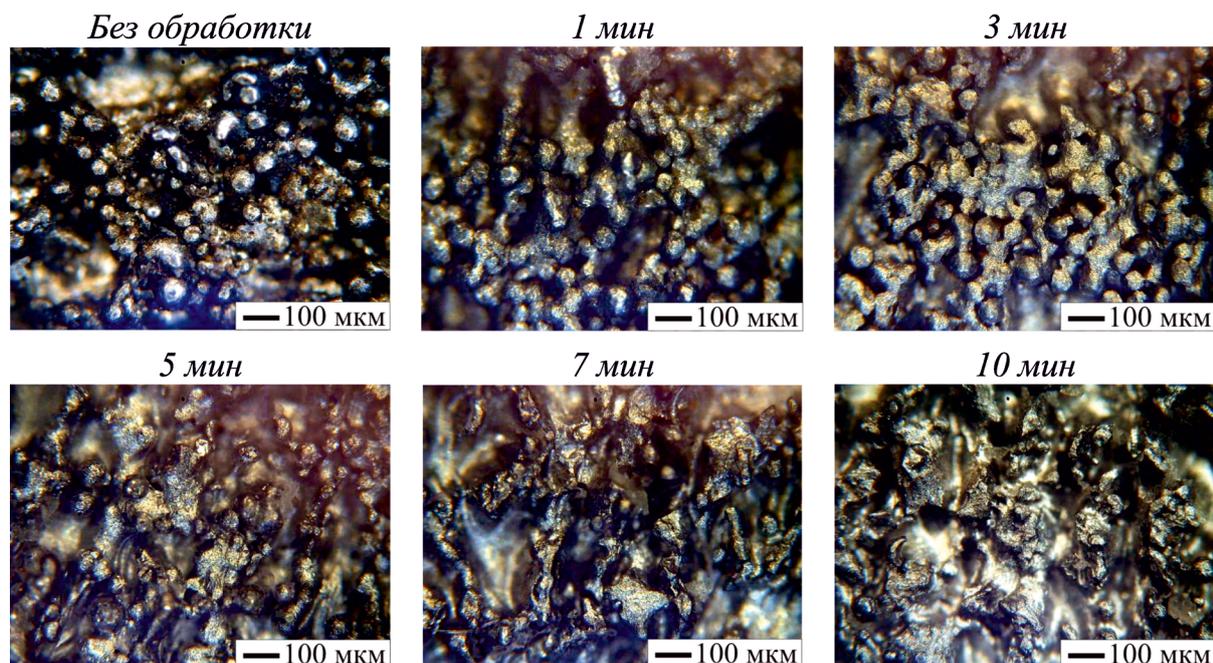


Рис. 9. Динамика изменения поверхности в процессе КАО + ХО

Fig. 9. Dynamics of surface changes during CAT + Chemical treatment

деформированных сфер и дорожек расплавления, также имеющих следы абразивного воздействия.

Механизм ультразвукового ППД заключается в пластической деформации неровностей поверхности (рис. 10).

Под действием нормально приложенной к поверхности силы происходит деформирование выступов неровностей. Высота сфер умень-

шается с образованием плоской площадки, одновременно они растут в ширину и начинают касаться других сфер. В результате на поверхности образуются деформированные области достаточно большой площади. При дальнейшей обработке начинают деформироваться сферы, располагающиеся ниже, и площадь деформированных областей растет. Наибольшая площадь

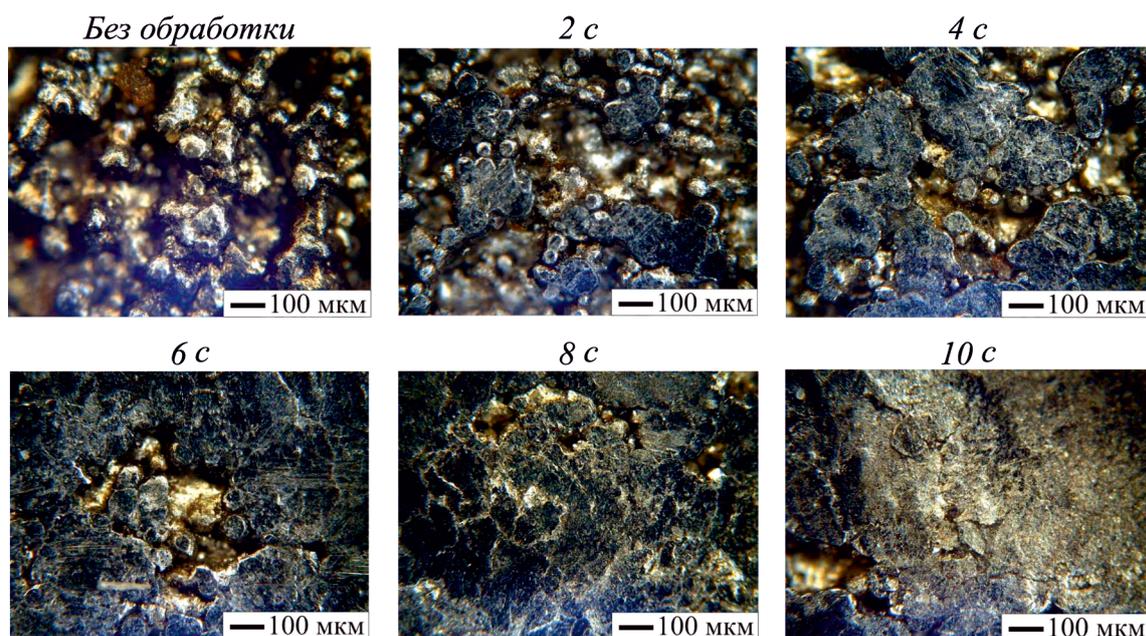


Рис. 10. Динамика изменения поверхности в процессе ультразвукового ППД

Fig. 10. Dynamics of surface changes during ultrasonic SPD

достигается при 10 с обработки. С увеличением времени обработки значительных изменений не происходит, что связано с достижением максимальной степени деформации.

Несмотря на значительный эффект по выглаживанию поверхности, для данного способа недоступна обработка впадин микрорельефа, что проиллюстрировано на всех снимках.

Анализ изменений микроструктуры приведен далее.

### Анализ изменений шероховатости поверхности

Полученные при рассмотренных видах обработки изменения поверхности приводят к изменению ее шероховатости. Участки профилей длиной 2,5 мм и значения высотных параметров шероховатости для всех видов обработки представлены в табл. 2.

Профиль микронеровностей контрольного образца представляет собой чередование высту-

Таблица 2

Table 2

#### Микрогеометрия поверхности Surface microgeometry

Обработка / Treatment	Участок профиля поверхности (2,5 мм) / Surface profile section (2.5 mm)	Параметры шероховатости / Roughness parameters
Без обработки / Without Treatment		$Ra = 28,6$ $Rz = 114$
ХО (30 мин) / Chemical treatment (30 min)		$Ra = 23,2$ $Rz = 103$
КЭО + ХО (15 мин) / CET and chemical treatment (15 min)		$Ra = 19,3$ $Rz = 94,2$
КАО + ХО (10 мин) / CAT and chemical treatment (10 min)		$Ra = 16,2$ $Rz = 80,5$
УЗ ППД (10 с) / USPD (10 sec)		$Ra = 13,6$ $Rz = 76,3$

пов с закругленными пиками и впадин с большим преобладанием выступов. Наибольшая высота профиля  $R_{\max} = 174$  мкм.

После ХО профиль имеет схожий рельеф, но с меньшей высотой выступов и немного большей шириной впадин. Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  снижается с 28,6 до 23,2 мкм.

Ультразвуковые методы обработки приводят к значительным изменениям профиля как по форме профилограммы, так и по числовым значениям параметров шероховатости.

Так, после КЭО + ХО профиль поверхности выравнивается и состоит из близких по размеру выступов и впадин, что связано с отсутствием на поверхности дефектов сферической формы. Параметр  $R_a$  уменьшается до 19,3 мкм.

Профиль после КАО + ХО отличается меньшим количеством впадин и большим количеством деформированных абразивом выступов;  $R_a = 16,2$  мкм, что составляет снижение на 43,5 %. Профилограмма после данного способа обработки также имеет наименьшую высоту 89 мкм.

Рельеф поверхности после ультразвукового ППД за счет наличия больших ровных площадок имеет наименьшее значение  $R_a = 13,6$  мкм, но при этом перепад между высотой выступов и глубиной впадин доходит до 98 мкм, что больше, чем при КАО + ХО. Это показывает, что со-

вместное кавитационно-абразивное воздействие является более эффективным способом уменьшения выступов поверхности.

### Оценка изменений субмикроструктуры

Объемные изображения топографии поверхностей размером  $308 \times 308$  нм (рис. 11) получены при проведении атомно-силовой микроскопии (АСМ) методом постоянной высоты (Constant Height), заключающимся в поддержании постоянного расстояния между кантилевером и исследуемой поверхностью в процессе сканирования.

По данным изображениям можно судить о механизмах образования исследуемых поверхностей.

Субмикроструктура контрольного образца имеет слегка округлую форму с волнообразными ступенями, что, вероятно, является следствием кристаллизации сферической частицы.

На АСМ-изображении после ХО показан участок с границей между сферой (правый угол изображения), имеющей ярко выраженные ступени после травления, и частью поверхности, полученной при нормальной кристаллизации дорожки расплава.

После КЭО + ХО полосчатая субмикроструктура является следствием направленного теплоотвода при кристаллизации дорожки расплава.

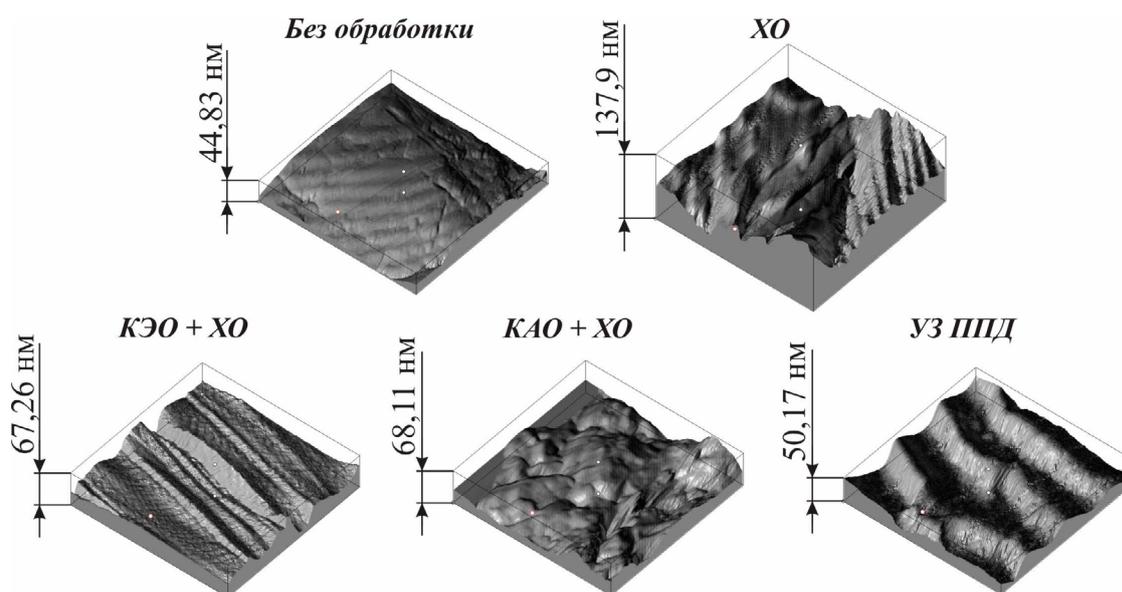


Рис. 11. АСМ-изображения поверхностей  $308 \times 308$  нм

Fig. 11. AFM images of surfaces ( $308 \times 308$  nm)

Поверхность после КАО + ХО отличается от других хаотичной структурой, образованной в результате периодического воздействия абразивных частиц.

Широкие ступени, похожие на наплывы, показывают течение металла перпендикулярно направлению деформации при ультразвуковом ППД.

**Исследование упрочненного слоя после ультразвукового ППД**

Изменения профиля поверхности (рис. 12) фактически соответствуют профилограммам поверхностей в табл. 2.

В результате смятия сферических неровностей профиль поверхности выравнивается и представляет собой крупные прямолинейные участки, чередующиеся со впадинами. При этом поверхностный слой приобретает некоторые дефекты (далее номер дефекта соответствует обозначению на рис. 12).

1. Несплошность металла в местах контакта деформированных сфер в виде вертикальных трещин.
2. Выкрашивание сфер под действием вибраций и ударной нагрузки.
3. Частично деформированные сферы со слабой адгезией к поверхности.
4. Необработанные глубокие впадины, которые повышают шероховатость и в которых могут располагаться прилипшие частицы порошка.

Деформированный слой после ультразвукового ППД составляет около 90...100 мкм. Без обработки образец имеет типичную для сплава Ti6Al4V пластинчатую микроструктуру, одинаковую в поверхностном слое (рис. 13, а) и в основном металле (рис. 13, б). После обработки микроструктура материала имеет чётко выраженные следы деформации (рис. 13 в, г). Причем участок поверхности без сфер (рис. 13, в) деформирован в большей степени, чем участок со сферами (рис. 13, г), где сами сферы деформированы значительно сильнее, чем дальнейший слой металла.

Деформированный слой отличается повышенной микротвёрдостью (рис. 14). Максимальное упрочнение достигается ближе к краю поверхностного слоя и составляет примерно 35 %. При удалении от поверхности микротвёрдость постепенно снижается, достигая уровня основного металла после 100 мкм.

В итоге ультразвуковое ППД приводит к значительному снижению шероховатости поверхности и созданию упрочненного слоя, но возникающие при этом дефекты поверхности могут привести к значительному снижению эксплуатационных характеристик детали. Поэтому целесообразно проводить ультразвуковое ППД после удаления дефектов поверхности вышеописанными способами: КЭО + ХО или КАО + ХО.

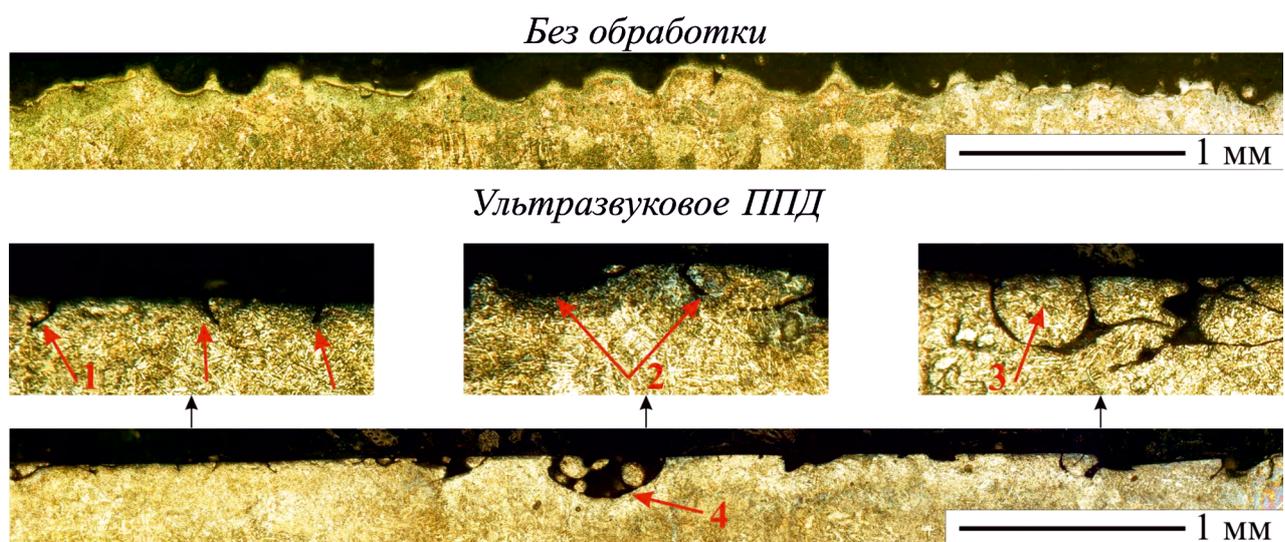


Рис. 12. Профиль поверхностей в поперечном микрошлифе:  
1, 2, 3, 4 – дефекты поверхностного слоя

Fig. 12. Surface Profile in Cross-Sectional Micrograph:  
1, 2, 3, 4 – surface layer defects

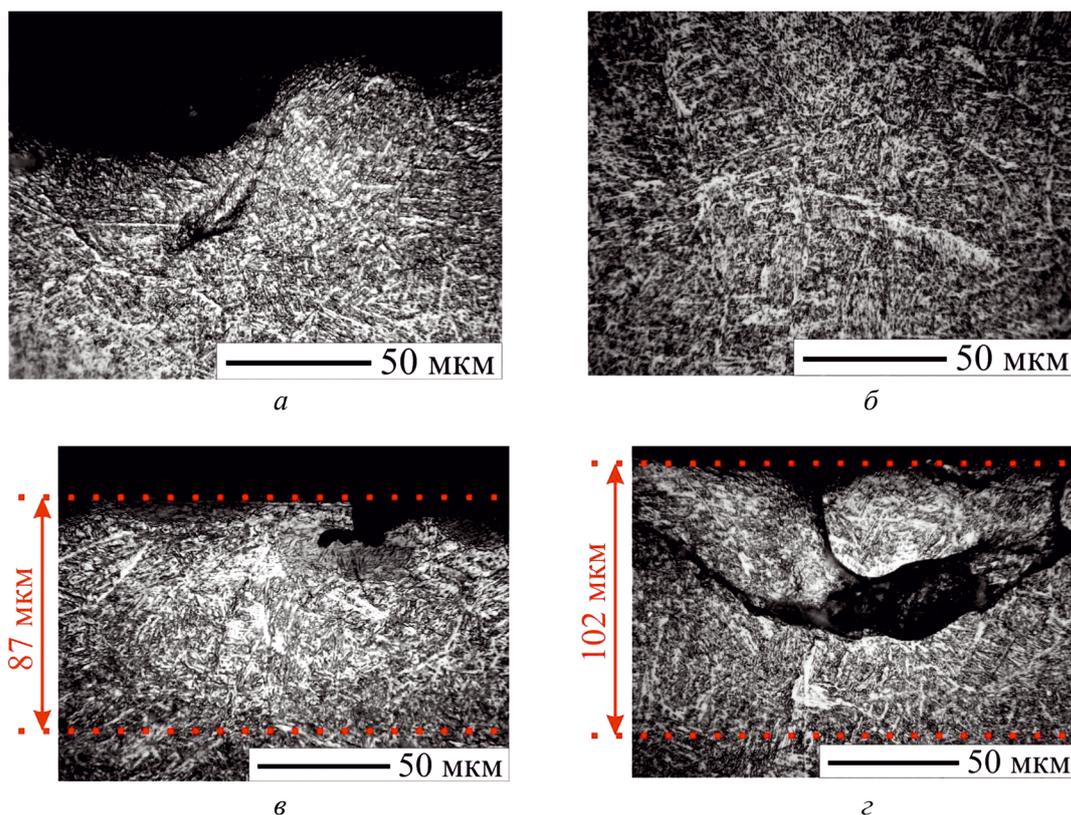


Рис. 13. Микроструктуры:

*a* – край контрольного образца; *б* – основной металл; *в* – край образца после ППД;  
*г* – деформированные сферы после ППД

Fig. 13. Microstructures:

*a* – edge of control sample; *b* – bulk material; *v* – edge of sample after USPD; *z* – deformed spheres after USPD

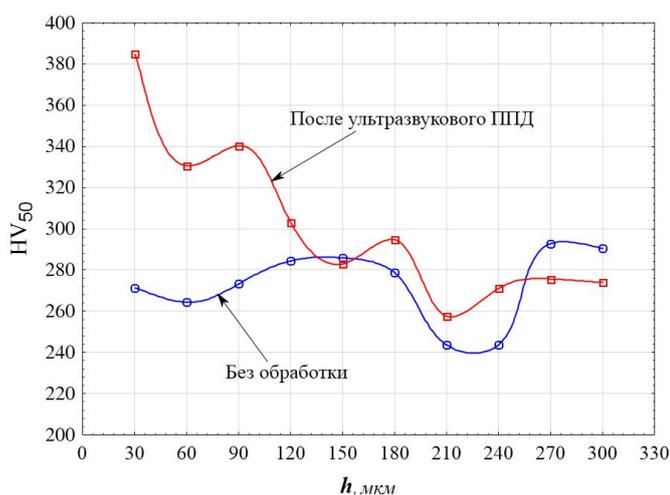


Рис. 14. Профили микротвердости образцов

Fig. 14. Microhardness profiles of samples

### Описание механизмов воздействия при ультразвуковой обработке

Объёмные изображения поверхностей образцов, полученные фотографированием с расширенным фокусом, представлены на рис. 15. Эти

изображения позволяют наглядно визуализировать изменения поверхности, происходящие при различных видах обработки.

Изменения состояния поверхности определяются видом применяемой ультразвуковой обработки и соответствующими ей механизмами воздействия, схематично изображёнными на рис. 16.

При КЭО основное воздействие оказывают кавитационные кластеры, возникающие в местах наибольших неоднородностей поверхности, которыми являются сферические дефекты и впадины микронеровностей. Образующиеся при схлопывании кластеров давление и температура приводят к пластической деформации поверхности, удалению сфер и увеличению глубин впадин. Поскольку на рассматриваемых образцах впадины в основном образованы между сферами, то в процессе обработки до момента удаления всех сфер шероховатость будет снижаться. Совмещение КЭО + ХО значительно ускоряет

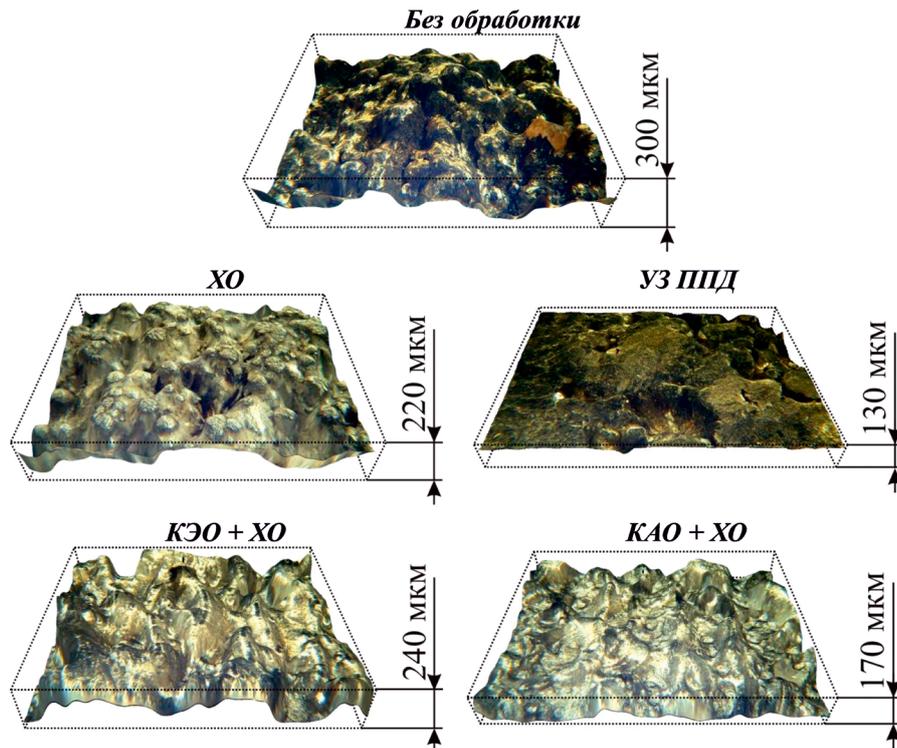


Рис. 15. Объёмные изображения поверхностей после различных видов обработки

Fig. 15. Three-dimensional images of surfaces after various treatments

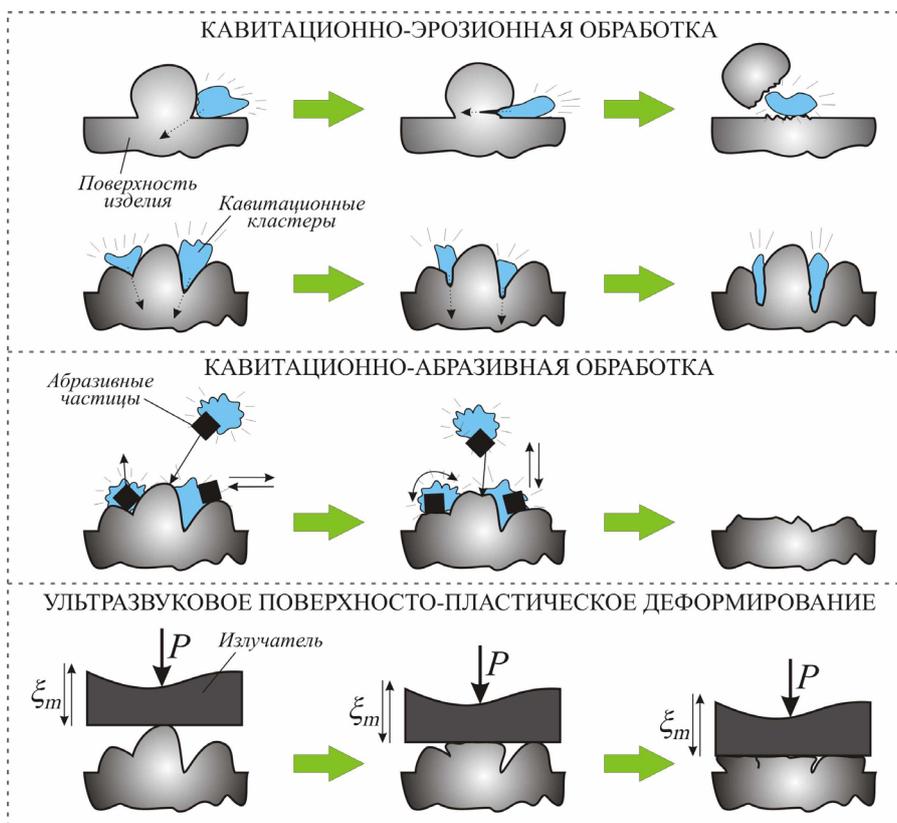


Рис. 16. Схематическое изображение динамики изменения поверхности при различных видах ультразвуковой обработки

Fig. 16. Schematic illustration of surface change dynamics during various types of ultrasonic treatment

процесс обработки за счет удаления прочной оксидной плёнки и интенсификации химического травления за счет высоких температур.

При схлопывании кластеров в процессе КАО возникающие ударные волны воспринимаются абразивными частицами, которые ударяются о поверхность и оказывают микрорежущее воздействие. Помимо этого, частицы при взаимодействии с кластером совершают колебательные, вращательные и продольные перемещения вдоль поверхности, деформируя её неровности.

При ультразвуковом ППД основным механизмом является деформация выступов микронеровностей и сфер под действием высокочастотной микроударной нагрузки.

### Выводы

В результате проведенных сравнительных исследований по различным видам ультразвуковой обработки образцов из титанового сплава Ti6Al4V, полученных методом селективного лазерного плавления, установлено следующее:

– микрогеометрия поверхности образца представляет собой совокупность сферических дефектов, обусловленных особенностями производства и являющихся причиной высокой шероховатости;

– жидкостные способы обработки КЭО и КАО эффективны в среде травителя (3 % HF + 5 % HNO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O), который позволяет убрать оксидную плёнку;

– сравнение КЭО и КАО с помощью высокоскоростной съёмки показало, что при КЭО кавитационные пузырьки объединяются в кластеры в местах наибольших неровностей поверхности, где осуществляют работу, а при КАО происходит совместное воздействие кластеров и абразивных частиц, которые помимо ударов о поверхность совершают колебательные, вращательные и продольные движения, деформируя выступы микронеровностей;

– высокие давления и температуры, возникающие при схлопывании кавитационных пузырьков, значительно ускоряют химическое травление в местах схлопывания;

– КЭО + ХО в течение 15 мин приводит к полному удалению всех сферических дефектов поверхности, которая после обработки представляет собой чередование дорожек расплава;

– при КАО + ХО возникающие давления и температуры в значительной мере воспринимаются абразивными частицами. Они получают ускорение и совершают микрорежущие действия, в результате которых часть дефектов удаляется, а часть деформируется;

– обработка методом ультразвукового ППД приводит к смятию дефектов поверхности и образованию на ней больших плоских участков;

– при всех рассмотренных видах ультразвуковой обработки происходит снижение шероховатости поверхности: *Ra* при КЭО + ХО снижается на 33 %, при КАО + ХО – на 43 %, при ультразвуковом ППД – на 52 %, но при этом показатель наибольшей высоты неровностей *Rmax* меньше всего при КАО + ХО;

– анализ структуры микрошлифа после ППД показывает наличие упрочненного слоя глубиной примерно 100 мкм с увеличением микротвёрдости до 35 %;

– главным недостатком ППД является образование в поверхностном слое дефектов в виде трещин и частично деформированных сфер, а также наличие необработанных глубоких впадин поверхностей;

– перед ППД целесообразно проводить КЭО + ХО или КАО + ХО для удаления дефектов поверхности.

### Список литературы

1. A review of post-processing technologies in additive manufacturing / X. Peng, L. Kong, J.Y.H. Fuh, H. Wang // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 5 (2). – P. 38. – DOI: 10.3390/jmmp5020038.

2. Сундуков С.К. Ультразвуковые технологии в процессах получения неразъемных соединений. – М.: Техполиграфцентр, 2023. – 269 с. – ISBN 978-5-94385-209-1.

3. Григорьев С.Н., Тарасова Т.В. Возможности технологии аддитивного производства для изготовления сложнопрофильных деталей и получения функциональных покрытий из металлических порошков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2015. – № 10 (724). – С. 5–10.

4. Possibilities of additive technologies for the manufacturing of tooling from corrosion-resistant steels in order to protect parts surfaces from thermochemical treatment / A. Metel, T. Tarasova, E. Gutsaliuk, R. Khmyrov, S. Egorov, S. Grigoriev // Metals. – 2021. – Vol. 11 (10). – P. 1551. – DOI: 10.3390/met11101551.

5. Current surface issues in additive manufacturing / J. Magnien, P. Cosemans, N. Nutal, T. Kairet // *Plasma Processes and Polymers*. – 2020. – Vol. 17 (1). – P. 1900154. – DOI: 10.1002/ppap.201900154.
6. *Tarasova T.V., Nazarov A.P., Prokof'ev M.V.* Effect of the regimes of selective laser melting on the structure and physicomechanical properties of cobalt-base superalloys // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2015. – Vol. 116 (6). – P. 601–605. – DOI: 10.1134/S0031918X15060101.
7. Ultrasonic methods for improving object surface quality prepared by corrosion-resistant steel powder selective laser melting / V.A. Aleksandrov, D.S. Fatyukhin, S.K. Sundukov, A.A. Filatova // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2018. – Vol. 60 (5–6). – P. 381–386. – DOI: 10.1007/s11041-018-0287-1.
8. Перспективы применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве / С.Г. Конов, Д.В. Котобан, С.К. Сундуков, Д.С. Фатюхин // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2015. – № 9 (51). – С. 28–34.
9. *Tang C., Tan J.L., Wong C.H.* A numerical investigation on the physical mechanisms of single track defects in selective laser melting // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 126. – P. 957–968. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.073.
10. *Zhang B., Li Y., Bai Q.* Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 30. – P. 515–527. – DOI: 10.1007/s10033-017-0121-5.
11. On morphological surface features of the parts printed by selective laser melting (SLM) / M.H. Nasab, D. Gastaldi, N. Lecis, M. Vedani // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 24. – P. 373–377. – DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.011.
12. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: process parameters, defects and post-treatments / A.K. Singla, M. Banerjee, A. Sharma, J. Singh, A. Bansal, M.K. Gupta, N. Khanna, A.S. Shahi, D.K. Goyal // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 64. – P. 161–187. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.009.
13. Evolution mechanism of surface morphology and internal hole defect of 18Ni300 maraging steel fabricated by selective laser melting / Y. Bai, C. Zhao, D. Wang, H. Wang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2022. – Vol. 299. – P. 117328. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117328.
14. Surface characteristics enhancement and morphology evolution of selective-laser-melting (SLM) fabricated stainless steel 316L by laser polishing / C. Li, D. Liu, G. Liu, Sh. Liu, X. Jin, Y. Bai // *Optics & Laser Technology*. – 2023. – Vol. 162. – P. 109246. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109246.
15. Effect of high layer thickness on surface quality and defect behavior of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting / X. Shi, C. Yan, W. Feng, Y. Zhang, Z. Leng // *Optics & Laser Technology*. – 2020. – Vol. 132. – P. 106471. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106471.
16. *Giorleo L., Ceretti E., Giardini C.* Ti surface laser polishing: effect of laser path and assist gas // *Procedia CIRP*. – 2015. – Vol. 33. – P. 446–451. – DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.102.
17. The effects of Hot Isostatic Pressing on parts fabricated by binder jetting additive manufacturing / A.Y. Kumar, Y. Bai, A. Eklund, C.B. Williams // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 24. – P. 115–124. – DOI: 10.1016/j.addma.2018.09.021.
18. Effect of Hot Isostatic Pressure treatment on the Electron-Beam Melted Ti-6Al-4V specimens / V. Popov, A. Katz-Demyanetz, A. Garkun, G. Muller, E. Strokin, H. Rosenson // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 21. – P. 125–132. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.102.
19. Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing / E. Łyczkowska, P. Szymczyk, B. Dybała, E. Chlebus // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2014. – Vol. 14 (4). – P. 586–594. – DOI: 10.1016/j.acme.2014.03.001.
20. Electrochemical polishing of selective laser melted Inconel 718 / S. Jain, M. Corliss, B. Tai, W.N. Hung // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 34. – P. 239–246. – DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.145.
21. Surface roughness reduction of additive manufactured products by applying a functional coating using ultrasonic spray coating / S. Slegers, M. Linzas, J. Drijkoningen, J. D'Haen, N.K. Reddy, W. Deferme // *Coatings*. – 2017. – Vol. 7. – P. 208. – DOI: 10.3390/coatings7120208.
22. Severe plastic deformation as a processing tool for strengthening of additive manufactured alloys / A. Hosseinzadeh, A. Radi, J. Richter, T. Wegener, S.V. Sajadifar, T. Niendorf, G.G. Yapici // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 68 (2). – P. 788–795. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.070.
23. Additive manufacturing with ultrasound / R.I. Nigmatzyanov, S.K. Sundukov, D.S. Fatyukhin, V.V. Grib, S.K. Kartsov // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37 (12). – P. 1070–1073. – DOI: 10.3103/S1068798X17120140.
24. *Sundukov S.K.* Ultrasonic vibration mechanism in making permanent joints // *Steel in Translation*. – 2024. – Vol. 54 (1). – P. 10–15. – DOI: 10.3103/S0967091224700190.
25. Effect of cavitation erosion wear, vibration tumbling, and heat treatment on additively manufactured surface quality and properties / S.N. Grigoriev, A.S. Metel, T.V. Tarasova, A.A. Filatova, S.K. Sundukov, M.A. Volosova, A.A. Okunkova, Y.A. Melnik, P.A. Podrabinnik // *Metals*. – 2020. – Vol. 10 (11). – P. 1540. – DOI: 10.3390/met10111540.

26. Influence of postprocessing on wear resistance of aerospace steel parts produced by laser powder bed fusion / A.S. Metel, S.N. Grigoriev, T.V. Tarasova, A.A. Filatova, S.K. Sundukov, M.A. Volosova, A.A. Okunkova, Y.A. Melnik, P.A. Podrabinnik // *Technologies*. – 2020. – Vol. 8 (4). – P. 73. – DOI: 10.3390/technologies8040073.
27. *Tan K.L., Yeo S.H.* Surface modification of additive manufactured components by ultrasonic cavitation abrasive finishing // *Wear*. – 2017. – Vol. 378–379. – P. 90–95. – DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.030.
28. *Tan K.L., Yeo S.H.* Surface finishing on IN625 additively manufactured surfaces by combined ultrasonic cavitation and abrasion // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 31. – P. 100938. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.100938.
29. *Wang J., Zhu J., Liew P.J.* Material removal in ultrasonic abrasive polishing of additive manufactured components // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9 (24). – P. 5359. – DOI: 10.3390/app9245359.
30. *Tan W.X., Tan K.W., Tan K.L.* Developing high intensity ultrasonic cleaning (HIUC) for post-processing additively manufactured metal components // *Ultrasonics*. – 2022. – Vol. 126. – P. 106829. – DOI: 10.1016/j.ultras.2022.106829.
31. *Goh K.W.S., Tan K.L., Yeo S.H.* Hybrid ultrasonic cavitation abrasive peening and electrochemical polishing on additively manufactured AlSi10Mg components // *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Surface Enhancement (INCASE) 2023*. – Singapore: Springer, 2023. – P. 59–66. – DOI: 10.1007/978-981-99-8643-9\_7.
32. *Sun M., Toyserkani E.* A novel hybrid ultrasound abrasive-driven electrochemical surface finishing technique for additively manufactured Ti6Al4V parts // *Inventions*. – 2024. – Vol. 9 (2). – P. 45. – DOI: 10.3390/inventions9020045.
33. *Wang B., Castellana J., Melkote S.N.* A hybrid post-processing method for improving the surface quality of additively manufactured metal parts // *CIRP Annals*. – 2021. – Vol. 70 (1). – P. 175–178. – DOI: 10.1016/j.cirp.2021.03.010.
34. Effect of electropolishing on ultrasonic cavitation in hybrid post-processing of additively manufactured metal surfaces / J.H. Jeon, N. Panpalia, A. Rashid, S.N. Melkote // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 120. – P. 703–711. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.04.092.
35. Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing and its fundamental performance in Al6061 machining / Q. Wang, M.S. Vohra, S. Bai, S.H. Yeo // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 113. – P. 473–481. – DOI: 10.1007/s00170-021-06666-7.
36. *Nagalingam A.P., Yuvaraj H.K., Yeo S.H.* Synergistic effects in hydrodynamic cavitation abrasive finishing for internal surface-finish enhancement of additive-manufactured components // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 33. – P. 101110. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101110.
37. *Nagalingam A.P., Yeo S.H.* Controlled hydrodynamic cavitation erosion with abrasive particles for internal surface modification of additive manufactured components // *Wear*. – 2018. – Vol. 414. – P. 89–100. – DOI: 10.1016/j.wear.2018.08.006.
38. Improving surface finish and wear resistance of additive manufactured nickel-titanium by ultrasonic nano-crystal surface modification / C. Ma, M.T. Andani, H. Qin, N.S. Moghaddam, H. Ibrahim, A. Jahadkbar, A. Amerinatanzi, Z. Ren, H. Zhang, G.L. Doll, Y. Dong, M. Elahinia, C. Ye // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – Vol. 249. – P. 433–440. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.06.038.
39. Ultrasonic surface post-processing of hot isostatic pressed and heat treated superalloy parts manufactured by laser powder bed fusion / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk, O.O. Pedash, V.V. Dzhemelinskyi, A. Lamikiz // *Additive Manufacturing Letters*. – 2022. – Vol. 3. – P. 100063. – DOI: 10.1016/j.addlet.2022.100063.
40. Effect of electropulsing-assisted ultrasonic nanocrystal surface modification on microstructures and hardness of additive manufactured Inconel 718 / Y. Ye, C. Zhang, L. Gao, L. Peng, G. Liu, Y. Zhang, C. Tang, T. Huang, C. Ye // *Engineering Failure Analysis*. – 2023. – Vol. 153. – P. 107611. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107611.
41. Surface properties of additively manufactured 316L steel subjected to ultrasonic rolling / Q. Xu, Z. Qiu, D. Jiang, G. Cai, X. Yang, J. Liu, G. Li // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2024. – Vol. 34 (2). – P. 1733–1742. – DOI: 10.1007/s11665-024-09173-4.
42. *Amanov A., Karimbaev R.M.* Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification temperature: microstructural evolution, mechanical properties and tribological behavior of silicon carbide manufactured by additive manufacturing // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 425. – P. 127688. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127688.
43. Effects of ultrasonic impact treatment on the stress-controlled fatigue performance of additively manufactured DMLS Ti-6Al-4V alloy / P. Walker, S. Malz, E. Trudel, S. Nosir, M.S.A. ElSayed, L. Kok // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9 (22). – P. 4787. – DOI: 10.3390/app9224787.
44. Superior effects of hybrid laser shock peening and ultrasonic nanocrystalline surface modifica-

tion on fatigue behavior of additive manufactured Al-Si10Mg / E. Maleki, S. Bagherifard, O. Unal, A. Jam, S. Shao, M. Guagliano, N. Shamsaei // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 463. – P. 129512. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129512.

45. Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the surface integrity, microstructure, and wear resistance of 300M martensitic ultra-high strength steel / W. Zhao, D. Liu, R. Chiang, H. Qin, X. Zhang, H. Zhang, J. Liu, Z. Ren, R. Zhang, G.L. Doll, V.K. Vasudevan, Y. Dong, C. Ye // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 285. – P. 116767. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116767.

46. *Teramachi A., Yan J.* Improving the surface integrity of additive-manufactured metal parts by ultrasonic vibration-assisted burnishing // *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*. – 2019. – Vol. 7 (2) – P. 024501. – DOI: 10.1115/1.4043344.

47. The effect of ultrasonic impact treatment on deformation and fracture of electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V under uniaxial tension / A.V. Panin, M.S. Kazachenok, A.I. Dmitriev, A.Y. Niko-

nov, O.B. Perevalova, L.A. Kazantseva, E.A. Sinyakova, S.A. Martynov // *Materials Science and Engineering: A*. – 2022. – Vol. 832. – P. 142458. – DOI: 10.1016/j.msea.2021.142458.

48. *Розенберг Л.Д.* Физика и техника мощного ультразвука. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – 689 с.

49. *Сундуков С.К.* Особенности наложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 50–66. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66.

50. *Приходько В.М.* Ультразвуковые технологии при производстве и ремонте автотракторной техники. – М.: Техполиграфцентр, 2000. – 252 с. – ISBN 5-900095-16-9.

51. Comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40Kh steels / D.S. Fatyukhin, R.I. Nigmatzyanov, V.M. Prikhodko, A.V. Sukhov, S.K. Sundukov // *Metals*. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 138. – DOI: 10.3390/met12010138.

## Конфликт интересов

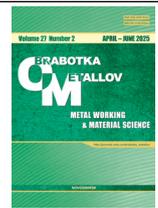
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Comparison of ultrasonic surface treatment methods applied to additively manufactured Ti-6Al-4V alloy

Sergey Sundukov<sup>a, \*</sup>, Ravil Nigmatzyanov<sup>b</sup>, Vyacheslav Prikhodko<sup>c</sup>,  
Dmitry Fatyukhin<sup>d</sup>, Vladimir Koldyushov<sup>e</sup>

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>,  [sergey-lefmo@yandex.ru](mailto:sergey-lefmo@yandex.ru); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0009-0008-1443-7584>,  [lefmo@yandex.ru](mailto:lefmo@yandex.ru);  
<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8261-0424>,  [prihodko@madi.ru](mailto:prihodko@madi.ru); <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>,  [mitriy2@yandex.ru](mailto:mitriy2@yandex.ru);  
<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0009-0005-6711-6256>,  [v.koldyushov@list.ru](mailto:v.koldyushov@list.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 30 January 2025

Revised: 17 February 2025

Accepted: 17 March 2025

Available online: 15 June 2025

#### Keywords:

Ultrasonic treatment

Cavitation

Abrasive

Surface deformation

Selective laser melting

Surface roughness

Spherical defects

#### Funding

This research was funded by the Russian Science Foundation, grant number No. 21-79-00185, <https://rscf.ru/project/24-19-00463/>

### ABSTRACT

**Introduction.** Selective Laser Melting (*SLM*) of metal powders enables the fabrication of parts with arbitrary geometries, which is unattainable through conventional manufacturing technologies. The main disadvantages of the method include high surface roughness, resulting from metal spattering, spheroidization, partial melting and powder adhesion, as well as difficulties with finishing complex surface areas. One effective approach for processing such parts is the application of ultrasonic liquid technologies, where cavitation bubbles act as working bodies, penetrating and performing work on any area of the surface. **The purpose** of this study is to determine the influence of different types of ultrasonic treatment on the surface properties obtained by selective laser melting through comparative testing. **Materials and methods.** Samples made from *Ti-6Al-4V* titanium alloy, manufactured using selective laser melting on an *EOS M280* machine, were investigated. For ultrasonic treatment, a rod-shaped magnetostrictive vibratory system was used, with the end of the emitter positioned 20 mm from the side surface of the sample. A etching solution (3% HF + 5% HNO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O) was used as a liquid medium to remove the oxide film that hinders the effect of cavitation. Cavitation-erosion (*CET*) treatment, cavitation-abrasive (*CAT*) treatment, and additionally, ultrasonic surface plastic deformation (*USPD*) were performed. After treatment, the surface condition, roughness, and sub-microgeometry were assessed for all samples. The microstructure of the *USPD*-treated samples was also investigated. **Results and discussion.** A high-speed imaging method was used to compare the main mechanisms of interaction with the surface during *CET* and *CAT*. During *CET*, collapsing and pulsating cavitation clusters are observed, located at the points of highest peaks and valleys on the surface. During *CAT*, the micro-cutting action of abrasive particles is added. These particles receive shock waves generated by collapsing bubbles, hit the surface, and undergo oscillatory, rotational, and longitudinal movements. Comparison of the surface condition dynamics revealed that *CET* enables complete removal of surface defects down to the melt tracks. *CAT* removes some surface defects while deforming the remaining ones. During *USPD*, spherical defects are crushed, forming large flat areas. All types of ultrasonic treatment reduce surface roughness:  $R_a$  is reduced by 33% during *CET*, by 43% during *CAT*, and by 52% during *USPD*. However,  $R_{max}$  is lowest with *CAT*. The microstructure after *USPD* is characterized by a hardened layer with a depth of approximately 100 μm and an increase in microhardness up to 35%. However, after *USPD*, defects in the form of cracks, partially deformed spheres, and the presence of untreated deep surface depressions are formed in the surface layer, which significantly reduces performance characteristics. Therefore, it is advisable to perform *CET* or *CAT* before *USPD* to remove surface defects.

**For citation:** Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Fatyukhin D.S., Koldyushov V.K. Comparison of ultrasonic surface treatment methods applied to additively manufactured Ti-6Al-4V alloy. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 6–28. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-6-28. (In Russian).

### References

1. Peng X., Kong L., Fuh J.Y.H., Wang H. A review of post-processing technologies in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2021, vol. 5 (2), p. 38. DOI: 10.3390/jmmp5020038.

#### \* Corresponding author

Sundukov Sergey K., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Moscow Automobile and Road Construction  
 State Technical University (MADI),  
 64 Leningradsky prospect,  
 125319, Moscow, Russian Federation  
 Tel.: +7 926 369-19-70, e-mail: [sergey-lefmo@yandex.ru](mailto:sergey-lefmo@yandex.ru)

2. Sundukov S.K. *Ul'trazvukovye tekhnologii v protsessakh polucheniya neraz"emnykh soedinenii* [Ultrasonic technologies in the processes of obtaining permanent connections]. Moscow, Tekhpolygrafitsentr Publ., 2023. 263 p. ISBN 978-5-94385-209-1.
3. Grigor'ev S.N., Tarasova T.V. Vozmozhnosti tekhnologii additivnogo proizvodstva dlya izgotovleniya slozhnopofil'nykh detalei i polucheniya funktsional'nykh pokrytii iz metallicheskiikh poroshkov [Potential of additive manufacturing technology for manufacturing complex-shaped parts and obtaining functional coatings from metal powders]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2015, no. 10 (724), pp. 5–10.
4. Metel A., Tarasova T., Gutsaliuk E., Khmyrov R., Egorov S., Grigoriev S. Possibilities of additive technologies for the manufacturing of tooling from corrosion-resistant steels in order to protect parts surfaces from thermochemical treatment. *Metals*, 2021, vol. 11 (10), p. 1551. DOI: 10.3390/met11101551.
5. Magnien J., Cosemans P., Nutal N., Kairet T. Current surface issues in additive manufacturing. *Plasma Processes and Polymers*, 2020, vol. 17 (1), p. 1900154. DOI: 10.1002/ppap.201900154.
6. Tarasova T.V., Nazarov A.P., Prokof'ev M.V. Effect of the regimes of selective laser melting on the structure and physicomechanical properties of cobalt-base superalloys. *The Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, pp. 601–605. DOI: 10.1134/S0031918X15060101.
7. Aleksandrov V.A., Fatyukhin D.S., Sundukov S.K., Filatova A.A. Ultrasonic methods for improving object surface quality prepared by corrosion-resistant steel powder selective laser melting. *Metal Science and Heat Treatment*, 2018, vol. 60, pp. 381–386. DOI: 10.1007/s11041-018-0287-1.
8. Konov S.G., Kotoban D.V., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Perspektivy primeneniya ul'trazvukovykh tekhnologii v additivnom proizvodstve [Prospects for the application of ultrasonic technology in additive manufacturing]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2015, no. 9 (51), pp. 28–34.
9. Tang C., Tan J.L., Wong C.H. A numerical investigation on the physical mechanisms of single track defects in selective laser melting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 126, pt. B, pp. 957–968. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.073.
10. Zhang B., Li Y., Bai Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 30, pp. 515–527. DOI: 10.1007/s10033-017-0121-5.
11. Nasab M.H., Gastaldi D., Lecis N., Vedani M. On morphological surface features of the parts printed by selective laser melting (SLM). *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 24, pp. 373–377. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.011.
12. Singla A.K., Banerjee M., Sharma A., Singh J., Bansal A., Gupta M.K., Khanna N., Shahi A.S., Goyal D.K. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: process parameters, defects and post-treatments. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 64, pp. 161–187. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.009.
13. Bai Y., Zhao C., Wang D., Wang H. Evolution mechanism of surface morphology and internal hole defect of 18Ni300 maraging steel fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, vol. 299, p. 117328. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117328.
14. Li C., Liu D., Liu G., Liu Sh., Jin X., Bai Y. Surface characteristics enhancement and morphology evolution of selective-laser-melting (SLM) fabricated stainless steel 316L by laser polishing. *Optics & Laser Technology*, 2023, vol. 162, p. 109246. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109246.
15. Shi X., Yan C., Feng W., Zhang Y., Leng Z. Effect of high layer thickness on surface quality and defect behavior of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting. *Optics & Laser Technology*, 2020, vol. 132, p. 106471. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106471.
16. Giorleo L., Ceretti E., Giardini C. Ti surface laser polishing: effect of laser path and assist gas. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 33, pp. 446–451. DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.102.
17. Kumar A.Y., Bai Y., Eklund A., Williams C.B. The effects of Hot Isostatic Pressing on parts fabricated by binder jetting additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 24, pp. 115–124. DOI: 10.1016/j.addma.2018.09.021.
18. Popov V., Katz-Demyanetz A., Garkun A., Muller G., Strokin E., Rosenson H. Effect of Hot Isostatic Pressure treatment on the Electron-Beam Melted Ti-6Al-4V specimens. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 21, pp. 125–132. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.102.
19. Łyczkowska E., Szymczyk P., Dybała B., Chlebus E. Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014, vol. 14 (4), pp. 586–594. DOI: 10.1016/j.acme.2014.03.001.

20. Jain S., Corliss M., Tai B., Hung W.N. Electrochemical polishing of selective laser melted Inconel 718. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 34, pp. 239–246. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.145.
21. Slegers S., Linzas M., Drijkoningen J., D’Haen J., Reddy N.K., Deferme W. Surface roughness reduction of additive manufactured products by applying a functional coating using ultrasonic spray coating. *Coatings*, 2017, vol. 7 (12), p. 208. DOI: 10.3390/coatings7120208.
22. Hosseinzadeh A., Radi A., Richter J., Wegener T., Sajadifar S.V., Niendorf T., Yapici G.G. Severe plastic deformation as a processing tool for strengthening of additive manufactured alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68, pt. A, pp. 788–795. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.070.
23. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S., Grib V.V., Kartsov S.K. Additive manufacturing with ultrasound. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, pp. 1070–1073. DOI: 10.3103/S1068798X17120140.
24. Sundukov S.K. Ultrasonic vibration mechanism in making permanent joints. *Steel in Translation*, 2024, vol. 54, pp. 10–15. DOI: 10.3103/S0967091224700190.
25. Grigoriev S.N., Metel A.S., Tarasova T.V., Filatova A.A., Sundukov S.K., Volosova M.A., Okunkova A.A., Melnik Y.A., Podrabinnik P.A. Effect of cavitation erosion wear, vibration tumbling, and heat treatment on additively manufactured surface quality and properties. *Metals*, 2020, vol. 10 (11), p. 1540. DOI: 10.3390/met10111540.
26. Metel A.S., Grigoriev S.N., Tarasova T.V., Filatova A.A., Sundukov S.K., Volosova M.A., Okunkova A.A., Melnik Y.A., Podrabinnik P.A. Influence of postprocessing on wear resistance of aerospace steel parts produced by laser powder bed fusion. *Technologies*, 2020, vol. 8 (4), p. 73. DOI: 10.3390/technologies8040073.
27. Tan K.L., Yeo S.H. Surface modification of additive manufactured components by ultrasonic cavitation abrasive finishing. *Wear*, 2017, vol. 378–379, pp. 90–95. DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.030.
28. Tan K.L., Yeo S.H. Surface finishing on IN625 additively manufactured surfaces by combined ultrasonic cavitation and abrasion. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 31, p. 100938. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100938.
29. Wang J., Zhu J., Liew P.J. Material removal in ultrasonic abrasive polishing of additive manufactured components. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9 (24), p. 5359. DOI: 10.3390/app9245359.
30. Tan W.X., Tan K.W., Tan K.L. Developing high intensity ultrasonic cleaning (HIUC) for post-processing additively manufactured metal components. *Ultrasonics*, 2022, vol. 126, p. 106829. DOI: 10.1016/j.ultras.2022.106829.
31. Goh K.W.S., Tan K.L., Yeo S.H. Hybrid ultrasonic cavitation abrasive peening and electrochemical polishing on additively manufactured AlSi10Mg components. *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Surface Enhancement (INCASE) 2023*. Singapore, Springer, 2023, pp. 59–66. DOI: 10.1007/978-981-99-8643-9\_7.
32. Sun M., Toyserkani E. A novel hybrid ultrasound abrasive-driven electrochemical surface finishing technique for additively manufactured Ti6Al4V parts. *Inventions*, 2024, vol. 9 (2), p. 45. DOI: 10.3390/inventions9020045.
33. Wang B., Castellana J., Melkote S.N. A hybrid post-processing method for improving the surface quality of additively manufactured metal parts. *CIRP Annals*, 2021, vol. 70 (1), pp. 175–178. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.03.010.
34. Jeon J.H., Panpalia N., Rashid A., Melkote S.N. Effect of electropolishing on ultrasonic cavitation in hybrid post-processing of additively manufactured metal surfaces. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 120, pp. 703–711. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.04.092.
35. Wang Q., Vohra M.S., Bai S., Yeo S.H. Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing and its fundamental performance in Al6061 machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 113, pp. 473–481. DOI: 10.1007/s00170-021-06666-7.
36. Nagalingam A.P., Yuvaraj H.K., Yeo S.H. Synergistic effects in hydrodynamic cavitation abrasive finishing for internal surface-finish enhancement of additive-manufactured components. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 33, p. 101110. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101110.
37. Nagalingam A.P., Yeo S.H. Controlled hydrodynamic cavitation erosion with abrasive particles for internal surface modification of additive manufactured components. *Wear*, 2018, vol. 414–415, pp. 89–100. DOI: 10.1016/j.wear.2018.08.006.
38. Ma C., Andani M.T., Qin H., Moghaddam N.S., Ibrahim H., Jahadakar A., Amerinatanzi A., Ren Z., Zhang H., Doll G.L., Dong Y., Elahinia M., Ye C. Improving surface finish and wear resistance of additive manufactured nickel-titanium by ultrasonic nano-crystal surface modification. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 249, pp. 433–440. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.06.038.
39. Lesyk D.A., Martinez S., Mordyuk B.N., Pedash O.O., Dzhemelinskyi V.V., Lamikiz A. Ultrasonic surface post-processing of hot isostatic pressed and heat treated superalloy parts manufactured by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing Letters*, 2022, vol. 3, p. 100063. DOI: 10.1016/j.addlet.2022.100063.
40. Ye Y., Zhang C., Gao L., Peng L., Liu G., Zhang Y., Tang C., Huang T., Ye C. Effect of electropulsing-assisted ultrasonic nanocrystal surface modification on microstructures and hardness of additive manufactured Inconel 718. *Engineering Failure Analysis*, 2023, vol. 153, p. 107611. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107611.

41. Xu Q., Qiu Z., Jiang D., Cai G., Yang X., Liu J., Li G. Surface properties of additively manufactured 316L steel subjected to ultrasonic rolling. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, vol. 34 (2), pp. 1733–1742. DOI: 10.1007/s11665-024-09173-4.
42. Amanov A., Karimbaev R.M. Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification temperature: microstructural evolution, mechanical properties and tribological behavior of silicon carbide manufactured by additive manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 425, p. 127688. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127688.
43. Walker P., Malz S., Trudel E., Nosir S., ElSayed M.S.A., Kok L. Effects of ultrasonic impact treatment on the stress-controlled fatigue performance of additively manufactured DMLS Ti-6Al-4V alloy. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9 (22), p. 4787. DOI: 10.3390/app9224787.
44. Maleki E., Bagherifard S., Unal O., Jam A., Shao S., Guagliano M., Shamsaei N. Superior effects of hybrid laser shock peening and ultrasonic nanocrystalline surface modification on fatigue behavior of additive manufactured AlSi10Mg. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 463, p. 129512. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129512.
45. Zhao W., Liu D., Chiang R., Qin H., Zhang X.H., Zhang H., Liu J., Ren Z., Zhang R., Doll G.L., Vasudevan V.K., Dong Y., Ye C. Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the surface integrity, microstructure, and wear resistance of 300M martensitic ultra-high strength steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 285, p. 116767. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116767.
46. Teramachi A., Yan J. Improving the surface integrity of additive-manufactured metal parts by ultrasonic vibration-assisted burnishing. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 2019, vol. 7 (2), p. 024501. DOI: 10.1115/1.4043344.
47. Panin A.V., Kazachenok M.S., Dmitriev A.I., Nikonov A.Y., Perevalova O.B., Kazantseva L.A., Sinyakova E.A., Martynov S.A. The effect of ultrasonic impact treatment on deformation and fracture of electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V under uniaxial tension. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 832, p. 142458. DOI: 10.1016/j.msea.2021.142458.
48. Rozenberg L.D. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka*. T. 3. *Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* [Physics and technology of high-power ultrasound. Vol. 3. Physical foundations of ultrasonic technology]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 689 p.
49. Sundukov S.K. Osobennosti nalozheniya ul'trazvukovykh kolebaniy v protsesse svarki [Features of the superposition of ultrasonic vibrations in the welding process]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 50–66. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66.
50. Prikhod'ko V.M. *Ul'trazvukovye tekhnologii pri proizvodstve i remonte avtotraktornoj tekhniki* [Ultrasonic technologies in the production and repair of automotive equipment]. Moscow, Tekhpolygon Publ., 2000. 252 p. ISBN 5-900095-16-9.
51. Fatyukhin D.S., Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sukhov A.V., Sundukov S.K. A comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40kh steels. *Metals*, 2022, vol. 12 (1), p. 138. DOI: 10.3390/met12010138.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).