

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 621.9.048.6

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-17-28

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНОГО СОСТАВА НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Зеленина Анна Владимировна*, Гилета Виктор Павлович,
Самуль Артем Геннадьевич, Иванова Алина Владиславовна

Новосибирский государственный технический университет

* для корреспонденции: zelenina.2018@corp.nstu.ru



Информация о статье

Поступила:

18 апреля 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

22 сентября 2025 г.

Принята к публикации:

30 сентября 2025 г.

Опубликована:

23 октября 2025 г.

Ключевые слова:

титановые сплавы,
пластическое
деформирование,
шероховатость,
микротвердость, качество
поверхности

Аннотация.

Особенности титановых сплавов, которые являются основой их распространения в различных областях промышленности, также приводят к различным сложностям при их обработке как резанием, так и пластическим деформированием. Это требует более подробного изучения особенностей взаимодействия материала детали, смазочного состава и инструмента в процессе обработки. Работа посвящена определению влияния ультразвукового поверхностного пластического деформирования (УЗППД) на формирование стабильного микрогеометрического и физико-механического состояния поверхностного слоя (ПС) деталей, выполненных из титанового сплава ВТ3-1. Была проведена оценка влияния смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) на процесс УЗППД для рассматриваемого материала, после чего даны рекомендации по их подбору для получения необходимых характеристик поверхности детали. Осуществлен анализ влияния величины статической нагрузки на параметры поверхностного слоя, получаемые после обработки УЗППД. В качестве смазочных сред рассматривались различные классы средств (жидкие, консистентные). Установлено, что применение ультразвукового поверхностно-пластического деформирования по касательной схеме с использованием различных смазочных составов обеспечивает формирование стабильного регулярного микрорельефа с ячеистым строением на деталях из титанового сплава ВТ3-1. При этом наблюдается уменьшение высотно-шаговых характеристик шероховатости и увеличение несущей способности поверхности. Использование ультразвукового поверхностного пластического деформирования также позволило увеличить микротвердость поверхностного слоя на 25%. При этом кратность изменения величины прироста микротвердости и снижения шероховатости зависит от используемого смазочного состава. Установлено, что величина изменения рассматриваемых параметров также зависит от прилагаемого при обработке статического усилия.

Для цитирования: Зеленина А.В., Гилета В.П., Самуль А.Г., Иванова А.В. Влияние смазочного состава на качество поверхностного слоя деталей из титанового сплава при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 17-28. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-17-28, EDN: RSYKOH

Введение

Развитие науки и техники сопровождается повышением требований к деталям машин и

механизмов. Улучшение эксплуатационных свойств изделий достигается подбором материалов, обладающих наиболее

благоприятными свойствами для данных условий работы, и совершенствованием существующих и поиском новых методов обработки, особенно для финишных операций, ответственных за качество поверхностного слоя (КПС) деталей, определяющего их работоспособность

В последнее время в качестве конструкционных материалов все чаще используются титановые сплавы. Они нашли широкое применение в авиа-, машино-, судо-, приборостроении, медицине и других отраслях. Такое широкое использование этих сплавов обусловлено их специфическими свойствами – малой плотностью, высокой коррозионной и усталостной стойкостью и магнитной проницаемостью. При этом обработка титановых сплавов и получение требуемых показателей КПС как резанием, так и пластическим деформированием представляет значительные трудности, обусловленные низкой теплопроводностью, высоким коэффициентом трения в зоне обработки, высокой химической активностью титана, приводящим к сильному адгезионному взаимодействию детали и инструмента. Поэтому выбор рационального метода финишной обработки титановых сплавов представляет сложную технологическую задачу, во многом предопределяющую надежность машины.

Вопросы адгезионного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью детали, выполненной из титановых сплавов, хорошо изучены для процессов резания [1-3], но таких данных по поверхностному пластическому деформированию недостаточно. При этом известно, что методы поверхностного пластического деформирования (ППД) по сравнению с обработкой резанием позволяют в более широких пределах регулировать как шероховатость поверхности, так и физико-механическое состояние поверхностного слоя, тем самым формировать КПС, которое наиболее оптимально для заданных условий эксплуатации.

В литературе имеются противоречивые данные по целесообразности применения методов ППД при обработке деталей из титановых сплавов. Ряд авторов [4-6] не рекомендует применять методы поверхностного пластического деформирования, поскольку при обработке имеют место схватывание и разрушение мостиков сварки по материалу детали. Это приводит к образованию кратеров (изъянов поверхности), которые в большинстве случаев недопустимы по техническим требованиям к деталям.

Другие авторы [7] считают, что за счет варьирования скорости обработки и подачи инструмента можно изменять время взаимодействия поверхностей в зоне

контактирования и тем самым влиять на величину трения и адгезионного взаимодействия.

Одним из методов ППД, показавших высокую эффективность при обработке конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей, является ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование (УЗППД), технологические возможности которого применительно к титановым сплавам недостаточно изучены.

Особенности процесса УЗППД позволяют формировать поверхностный слой с низкими значениями высотных параметров шероховатости и высокими физико-механическими свойствами при малых значениях статической нагрузки. Согласно работам [8-18] ультразвуковая обработка титановых сплавов приводит к изменению кристаллического строения деформируемых поверхностей, что обуславливает изменение физико-механических свойств ПС. Несмотря на это, в данных работах мало информации о комплексном (геометрическом и физико-механическом) состоянии ПС и вопросах адгезионного взаимодействия материала детали и индентора. Это затрудняет формирование объективных выводов о выборе технологических параметров и условий УЗППД с целью получения стабильного качества поверхностного слоя на деталях, выполненных из титановых сплавов.

Снижения адгезионного воздействия между деформирующим инструментом и титановым сплавом можно добиться за счет применения смазочных сред. Из анализа литературных данных [19-22] также установлено, что остается практически не освещенным вопрос о влиянии смазочных композиций на формирование поверхностного слоя изделий из титановых сплавов после УЗППД.

Целью данной работы является определение влияния смазочного состава и величины статической нагрузки при обработке методом УЗППД на получение стабильных физико-механического и геометрического состояний поверхностного слоя деталей, выполненных из титановых сплавов ВТ3-1.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на цилиндрических образцах из титанового сплава ВТ3-1 диаметром 60 мм и длиной 120 мм. Для обеспечения равных начальных условий исследуемые поверхности предварительно подвергались точению на следующем режиме: скорость вращения детали $V = 94,2$ м/мин, подача $S = 0,107$ мм/об, глубина резания $t = 0,1$ мм. УЗППД проводилось на токарном станке 250ИТВМ по касательной схеме (Рис. 1) [23, 24]. Источником механических колебаний индентора служил магнитострикционный

преобразователь, к которому присоединялась колебательно-стержневая система. Преобразователь подключался к генератору ИЛ10-1.0.

Переменными параметрами обработки были выбраны статическая нагрузка ($P_{ст}$) и смазочно-охлаждающая среда. В качестве смазочно-охлаждающих средств использовались: индустриальное масло 40 (имеет высокие текучесть и удельную теплоемкость, а также среднюю вязкость); глицерин (органическое соединение высокой вязкости); моющее средство Fairy (имеет высокое содержание поверхностно-активных веществ); консистентная графитная смазка Felix (обладает высокой механической стабильностью, низкой текучестью и водостойкостью); консистентная смазка Neste (с содержанием дисульфида молибдена, обладает высокой вязкостью, прилипаемостью и водостойкостью). Стоит отметить, что применение консистентных смазок усложняет процесс нанесения состава на обрабатываемую поверхность, но обеспечивает более прочную и стабильную разделительную пленку. Постоянные параметры процесса УЗПД: амплитуда колебаний инструмента $A = 12$ мкм, частота колебаний $f = 20$ кГц, скорость детали $V_V = 75,4$ м/мин, подача $S = 0,1$ мм/об. Рабочая часть индентора выполнялась сферической формы с радиусом $r = 5$ мм из твердого сплава ВК8 (материал является рекомендуемым при обработке титановых сплавов методами резания). Чтобы исключить влияние налипания обрабатываемого материала, полученного во время обработки на предыдущем режиме, на инструмент, работа с каждым новым видом смазки осуществлялась новым индентором. При

использовании жидких смазывающих сред (индустриальное масло 40, глицерин, Fairy) поверхности смазывались перед обработкой и также средство подавалось в зону обработки струйным методом при ППД. Консистентная смазка намазывалась ровным слоем на всю обрабатываемую поверхность перед проведением УЗПД (Neste, Felix).

Исследование шероховатости поверхности образцов перед и после обработки осуществлялось при помощи профилографа-профилометра модели Mahr Mar Surf PS 10. Состояние поверхности изучалось с помощью оптического микроскопа Axiovert 40 MAT, с увеличением $\times 25$. Определение микротвердости проводилось на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0,5 Н.

Оценка микрогеометрического состояния поверхности осуществлялась при помощи следующих параметров шероховатости: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, Rz – полная высота неровностей профиля, $Rmax$ – наибольшая высота профиля, RSm – средний шаг неровностей, RS – средний шаг локальных выступов, t_p – относительная опорная длина профиля, Rsk – асимметричность, $A1$ – область пиков профиля, заполненных физическим материалом, $A2$ – область впадин профиля, заполненных смазкой, Vo – маслоудерживающий объем поверхности.

Результаты исследования

Значения параметров шероховатости, полученных до и после УЗПД, для исследуемых поверхностей приведены в Таблице 1 и на Рис. 2 – 4.

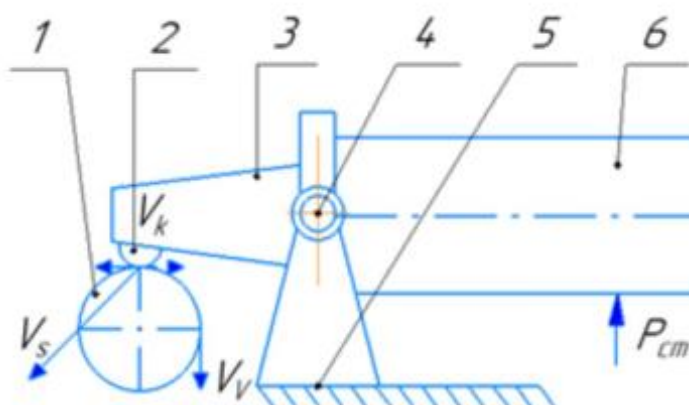


Рис. 1. Схема УЗПД по касательной схеме

1 – обрабатываемая деталь, 2 – деформатор, 3 – волновод, 4 – ось качания, 5 – основание, 6 – магнитострикционный преобразователь: $P_{ст}$ – статическая нагрузка, V_s – направление скорости подачи инструмента, V_v – направление скорости вращения детали, V_k – направление колебательной скорости инструмента

Fig. 1. The scheme of USSPD according to the tangent scheme

1 is the workpiece, 2 is the deformer, 3 is the waveguide, 4 is the swing axis, 5 is the base, 6 is the magnetostrictive transducer: $P_{ст}$ is the static load, V_s is the direction of the tool feed rate, V_v is the direction of the rotation speed of the part, V_k is the direction of the oscillatory speed of the tool

Таблица 1. Параметры шероховатости образцов
Table 1. Roughness parameters of the samples

Параметры	Статическая нагрузка P , Н											Исходное состояние
	50					100					120	
	Смазочная среда											
	Oil	Gl	Gr+D	Gr	Fr	Oil	Gl	Gr+D	Gr	Fr	Gr	
R_{max} , мкм	6,75	6,90	7,27	6,21	7,01	8,66	7,25	7,65	6,01	7,22	6,20	7,02
RS , мкм	88,48	75,13	91,96	62,94	98,56	98,19	75,47	83,71	73,92	96,07	78,39	132,96
t_P (-2.00, 5.0), %	40,5	61,9	49,89	57,98	51,06	45,82	49,6	45,62	58,13	52,03	64,17	52,7
Rsk	0,015	0,012	0,646	- 0.174	0,189	0,444	0,452	0,415	0,409	0,385	0,662	0,059
$A1$, мкм ² /мм	41,15	55,42	66,65	52,53	62,25	89,35	73,44	86,21	64	69,47	74,84	44,03
$A2$, мкм ² /мм	76,62	81,36	95,43	65,99	80,85	90,42	49,7	65,55	48,48	68,7	54,82	91,3
V_o , мм ³ /мм ²	0,76	0,81	0,95	0,65	0,8	0,9	0,49	0,65	0,48	0,68	0,54	0,91

где Oil – масло индустриальное 40, Gl – глицерин, Gr+D – консистентная смазка Neste (с содержанием дисульфида молибдена), Gr – консистентная графитная смазка Felix, Fr – моющее средство Fairy.

where Oil is industrial oil 40, Gl is glycerin, Gr+D is Neste grease (containing molybdenum disulfide), Gr is Felix graphite grease, Fr is Fairy detergent

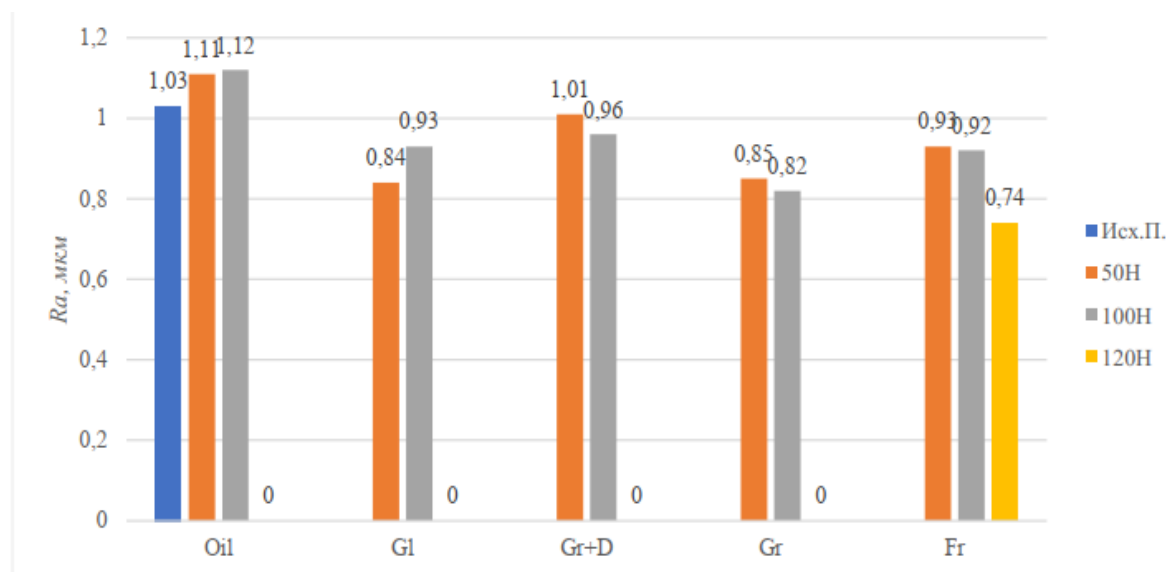


Рис. 2. Зависимость Ra от смазочной среды и нагрузки
Fig. 2. Dependence of Ra on the lubricating medium and load

Результаты экспериментальных исследований микротвердости поверхностей титанового сплава BT3-1 до и после УЗППД представлены в Таблице 2.

Обсуждения

Из данных, представленных в Таблице 1 и на Рис. 2-4, видно, что величина статической нагрузки и смазочно-охлаждающее технологическое средство оказывают влияние на геометрическое состояние поверхности детали. Так, использование в качестве СОТС индустриального масла 40 при проведении УЗППД не приводит к снижению шероховатости

поверхности – параметры Ra , Rz возрастают. Наименьшее значение высотных параметров шероховатости (Ra , Rz , R_{max}) наблюдается при проведении УЗППД с применением консистентной графитной смазки Felix, при которой происходит наибольшее сглаживание исходных микронеровностей. Также стоит отметить, что обработка в этой смазывающей среде приводит к формированию более четко выраженного регулярного рельефа, получению наименьшего значения параметра RS , наибольшей относительной опорной длины t_p . Различия в величине параметров незначительны

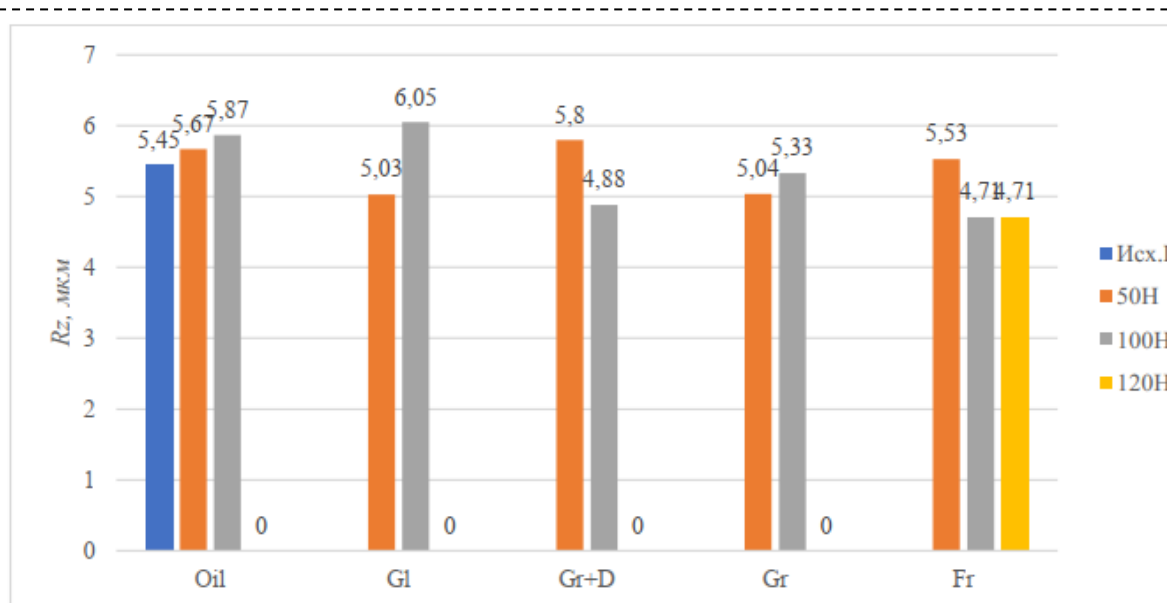


Рис. 3. Зависимость R_z от смазочной среды и нагрузки
 Fig. 3. Dependence of R_z on the lubricating medium and load

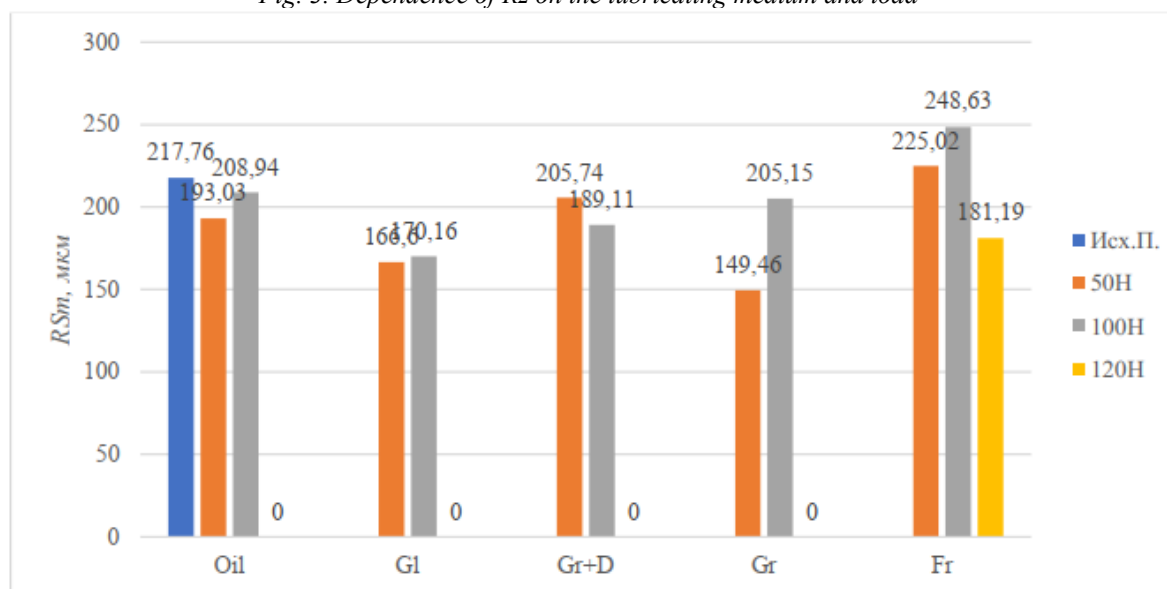


Рис. 4. Зависимость R_{Sm} от смазочной среды и нагрузки
 Fig. 4. Dependence of R_{Sm} on the lubricating medium and load

и не сильно отличаются от исходных, что говорит о высоких упругих свойствах смазочной среды, обеспечивающих равномерное давление на элементы шероховатости профиля в пятне контакта с индентором.

Увеличение статической нагрузки приводит к росту высотных параметров шероховатости при обработке Oil (R_a , R_z , R_{max}), Gl (R_a , R_z , R_{max}), Gr+D (R_z , R_{max}), но наблюдается снижение при использовании Gr (R_a , R_z , R_{max}), Fr (R_a , R_z). Влияние статической нагрузки на шаговые параметры носит сложный характер, общей тенденции не прослеживается, результаты отличаются для каждой отдельной смазки. Величина маслоудерживающего объема уменьшается с ростом статической нагрузки для всех исследуемых смазывающих сред.

После обработки со смазочной средой Gr при нагрузке 50 Н наблюдается отрицательная асимметричность (R_{sk}), что свидетельствует о формировании поверхности с высокими несущими свойствами. При этом наблюдается уменьшение маслоудерживающего объема поверхности, что можно объяснить наименьшим значением высотных параметров шероховатости.

Приведенные профилограммы (см. Рис. 5) исследуемых образцов указывают на то, что применение УЗПД приводит к уменьшению высотных характеристик профиля и более равномерному распределению материала, на что указывает уменьшающийся разбег высот и глубин между пиками и впадинами профиля соответственно в сравнении с исходной поверхностью. После ультразвуковой обработки

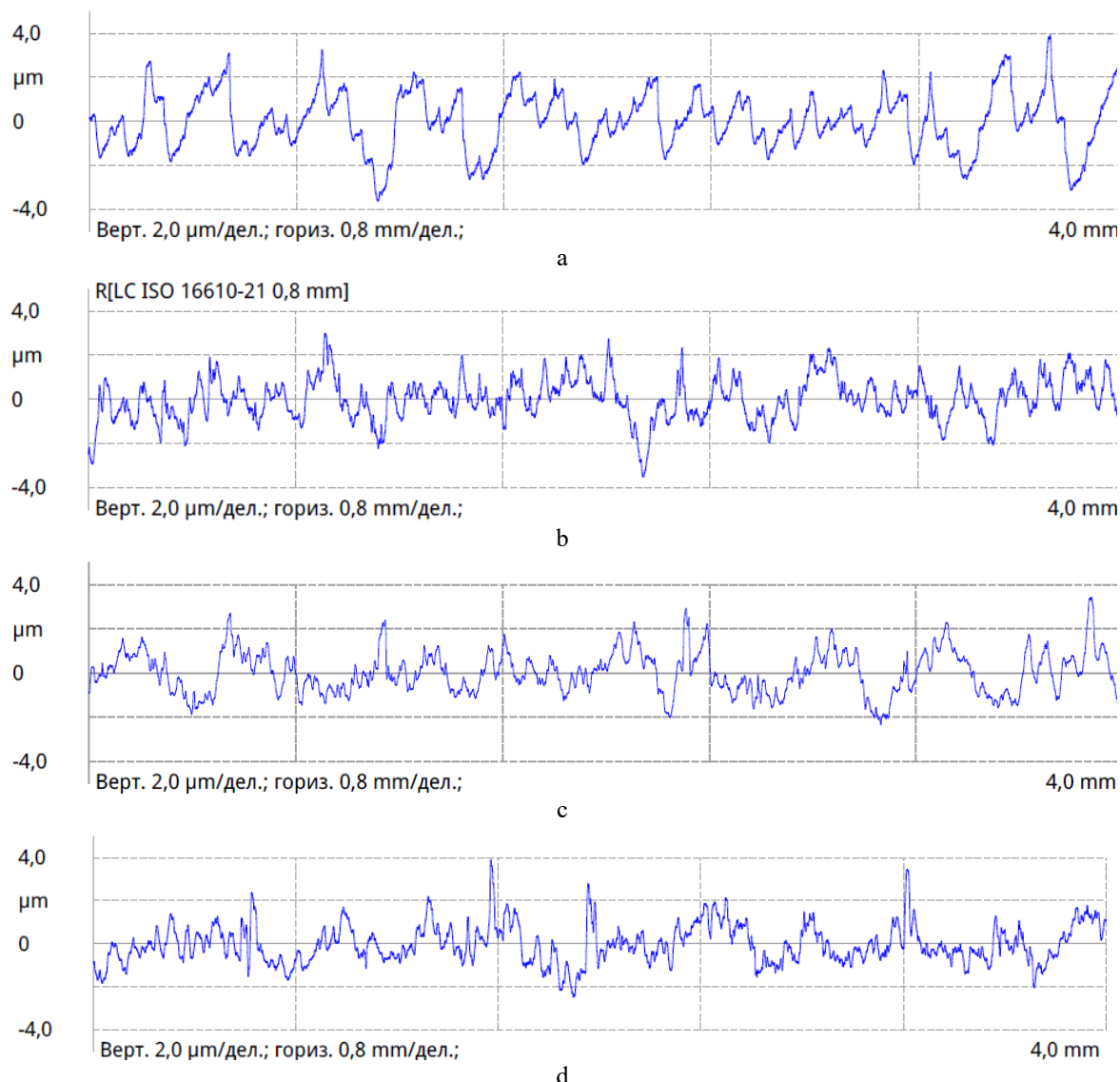


Рис. 5. Профилграмма поверхности до и после УЗППД

a – исходная поверхность, *b* – после УЗППД с консистентной графитной смазкой Felix ($P = 50 \text{ H}$), *c* – после УЗППД с консистентной графитной смазкой Felix ($P = 100 \text{ H}$), *d* – после УЗППД с консистентной графитной смазкой Felix ($P = 120 \text{ H}$)

Fig. 5. Profilogram of the surface before and after the USSPD

a – initial surface, *b* – after USSPD with Felix graphite grease ($P = 50 \text{ H}$), *c* – after USSPD with Felix graphite grease ($P = 100 \text{ H}$), *d* – after USSPD with Felix graphite grease ($P = 120 \text{ H}$)

формируется упорядоченная поверхность с регулярным шагом.

Анализ топографии (см. Рис. 6) позволяет сделать вывод о том, что применение различных смазывающих сред при обработке титанового сплава ВТ3-1 сказывается на конечном микрогеометрическом состоянии образцов. Видно, что применение УЗППД приводит к изменению топографии поверхности в исследуемом диапазоне параметров обработки. После предварительной токарной обработки структура поверхности представляет собой упорядоченные полосы, чередование выступов и впадин профиля (см. Рис. 6а), в то время как после УЗППД наблюдается формирование

регулярного ячеистого строения (независимо от нагрузки и смазочного состава), что не характерно для других методов ППД. Наиболее равномерная структура наблюдается при обработке с применением смазки Gr и с нагрузкой $P = 50 \text{ H}$.

На представленных фотографиях также видны следы адгезионного взаимодействия обрабатываемой детали и индентора. При равном значении статического усилия обработки ($P = 50 \text{ H}$) наблюдается наличие дефектов в виде кратеров при обработке в среде Gl и Gr+D (см. Рис. 5, b, c), и почти полное их отсутствие при использовании Gr (см. Рис. 5, d). При этом увеличение статической нагрузки до $P = 100 \text{ H}$ и

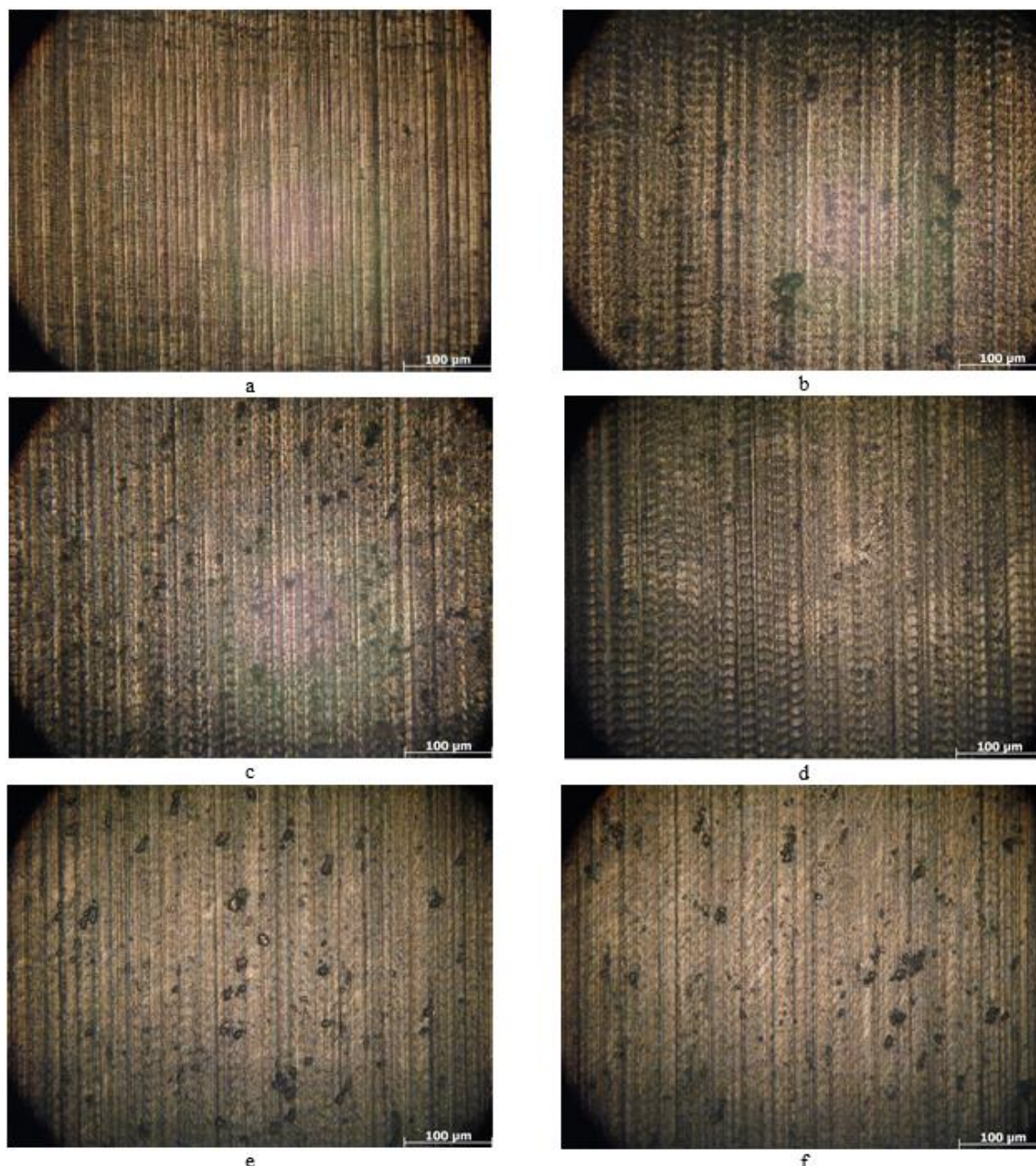


Рис. 6 – Топография поверхности образцов после обработки в различных условиях:
a – исходная поверхность; *b* – УЗППД с Gl, $P = 50$ Н; *c* – УЗППД с Gr+D, $P = 50$ Н; *d* – УЗППД с Gr, $P = 50$ Н; *e* – УЗППД с Gr, $P = 100$ Н; *f* – УЗППД с Gr, $P = 120$ Н

Fig. 6 – Topography of the surface of the samples after processing under various conditions:
a is the initial surface; *b* is the USSPD with Gl, $P = 50$ Н; *c* is the USSPD with Gr+D, $P = 50$ Н; *d* is the USSPD with Gr, $P = 50$ Н; *e* is the USSPD with Gr, $P = 100$ Н; *f* is the USSPD with Gr, $P = 120$ Н

$P = 120$ Н (см. Рис. 5, e, f) при обработке в Gr также приводит к образованию дефектов и росту их количества и размеров.

Образование кратеров объясняется тем, что из-за сродства деформирующего и обрабатываемого материала происходит схватывание, ведущее к образованию нароста на инденторе. Это в свою очередь изменяет условия обработки и приводит к ухудшению состояния ПС обрабатываемого изделия. Этот процесс существенно зависит от упругих свойств смазывающей среды – при их исчерпании

происходит непосредственный контакт инструмента с деталью и схватывание поверхностей. Наличие участков разрушения поверхности говорит о недостаточности прочности смазочной пленки, из-за чего происходит ее разрушение.

Согласно данным из Таблицы 2 можно заметить, что применение УЗППД приводит к повышению твердости ПС (это наблюдается для всех рассматриваемых СОТС и значений статической нагрузки). При этом максимальный прирост наблюдается при обработке с

применением графитной смазки Felix и с нагрузкой $P = 100$ Н (на 25%), не увеличиваясь при больших значениях нагружения в процессе УЗППД.

Выводы

Проведенные исследования позволили установить, что обработка ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием изделий из титанового сплава ВТЗ-1 обеспечивает повышение качества поверхностного слоя, а именно снижает шероховатость и повышает микротвердость. Важную роль для получения стабильного качества ПС играет смазочная среда. Наблюдается уменьшение высотных и шаговых параметров шероховатости (при обработке с использованием глицерина, консистентной смазки Neste и консистентной графитной смазки Felix независимо от нагрузки), что свидетельствует о сглаживании исходного профиля поверхности. Применение УЗППД приводит к формированию регулярного ячеистого строения на всех рассмотренных режимах. Кроме улучшения микрогеометрического состояния также наблюдается и повышение микротвердости – прирост до 25% (при нагрузке 100-120 Н). Совокупность полученных изменений должна привести к увеличению износостойкости и усталостной прочности поверхности.

Из представленных вариантов смазочных композиций наилучшее состояние поверхности (снижение высотных параметров шероховатости, увеличение микротвердости) наблюдается при применении консистентной графитной смазки Felix. Минимальное количество дефектов на обработанной поверхности говорит о том, что при данных условиях обработки имеет место минимальная сила адгезионного взаимодействия.

Установлено, что для полноценного использования свойств смазочной среды величина применяемой статической нагрузки не должна приводить к выдавливанию смазки из зоны контакта. При нарушении этого условия поверхности контактируют в условиях недостаточной смазки, что приводит к повышению температуры в зоне обработки, к образованию мостика сваривания и вырыванию материала с поверхности обрабатываемой детали.

Результаты исследования показали, что подбор оптимальной смазочной среды является важным аспектом получения качественной поверхности при обработке УЗППД и повышения производительности. Для обеспечения стабильного качества поверхностного слоя необходимо использовать смазывающие среды, у которых смазочный разделительный слой способен сохраняться под высокой нагрузкой. Таким образом, проведенное

исследование позволило установить основные пути дальнейшей работы, направленные на повышение эффективности применения УЗППД на деталях, изготавливаемых из титановых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров В. Ф. Резание материалов: учебное пособие Пермь : ПНИПУ, 2009. 364 с.
2. Парфеньева И. Е. Технология конструкционных материалов. М. : Учебное пособие, 2009. 84 с.
3. Ким В. А., Мокрицкий Б. Я., Самар Е. В., Якубов Ч. Ф. Адгезионные процессы контактного взаимодействия при резании материалов // Ученые записки КнАГТУ. 2018. № 11(33). С. 66–75.
4. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М. : Машиностроение, 1978. 152 с.
5. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М. : Машиностроение, 1987. 328 с. ил.
6. Вишнепольский Е. В., Павленко Д. В. Эффективность уплотнения некомпактных сплавов алмазным выглаживанием // Наука и техника. 2019. № 1. С. 62–69.
7. Гаркунов Д. Н., Мельников Э. Л., Гаврилюк В. С. Триботехника: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки «Автоматизированные технологии и производства», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». 2-е изд., стер. М. : КноРус, 2015. 408 с. ISBN 978-5-406-03934-2.
8. Ye C. [et al.] Surface amorphization of NiTi alloy induced by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification for improved mechanical properties // Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. 2016. Т. 53. Pp. 455–462.
9. Fan K. [et al.] Enhanced fretting fatigue strength of TC11 titanium alloy using laser-assisted ultrasonic surface rolling process // Tribology International. 2024. Т. 195. 109619.
10. Клименов В. А., Нехорошков О. Н., Уваркин П. В., Иванов Ю. Ф. Ультразвуковая финишная обработка как метод получения нанокристаллических структур // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем. Материалы VI Всероссийской (международной) конференции. М. : МИФИ, 2002. С. 168.
11. Клименов В. А. [и др.] Ультразвуковое модифицирование поверхности и его влияние на свойства покрытий // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № S2. С. 157–160.
12. Zha X. [et al.] Surface integrity and fatigue properties of Ti-6Al-4V alloy under the ultrasonic surface rolling process excited strain rate effect //

Journal of Materials Research and Technology. 2025. Т. 35. Рр. 416–434.

13. Zhang K. M. [et al.] Effect of high-frequency dynamic characteristics in the ultrasonic surface rolling process on the surface properties // Journal of Materials Processing Technology. 2024. Т. 327. С. 118353.

14. Клименов В. А. [и др.] Ультразвуковая обработка поверхности титановых сплавов. Субмикроструктурное состояние // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов VI Международной научно-практической конференции, 21–23 мая 2015 г., Юрга. Томск : Изд-во ТПУ, 2015. С. 94–99.

15. Борозна В. Ю. Влияние ультразвуковой поверхностной обработки на структуру и свойства титановых сплавов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. Т. 3. № 12. С. 341–349.

16. Borozna V., Zaitsev K., Klimenov V. Influence of ultrasonic superficial processing on properties of titanic alloys // METAL 2009-18th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 2009. Рр. 273–278.

17. Зайцев К. В., Аралкин А. С. Применение ультразвука при обработке углеродистых сталей и титановых сплавов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3.

18. Sydorenko S. I. [et al.] Deformation formation of nanostructured composites on the surface of $\pi 16$ aluminium alloy // Металлофизика и новейшие

технологии. 2012. Т. 34. № 8. С. 1101–1115.

19. Zhang K. M. [et al.] Effect of high-frequency dynamic characteristics in the ultrasonic surface rolling process on the surface properties // Journal of Materials Processing Technology. 2024. Т. 327. С. 118353.

20. Zheng K. [et al.] Ultrasonic rolling strengthening of TC11 titanium alloy surface: corrosion and wear properties under extreme conditions // Wear. 2024. Т. 550. С. 205415.

21. Luo X. [et al.] The effect of temperature on the deformed layer in the Ti6Al4V alloy subjected to the ultrasonic surface rolling process // Materials Today Communications. 2025. Р. 112129.

22. Yang Y. [et al.] Recent Progress in Ultrasonic Surface Rolling: A Comprehensive Overview // Advanced Engineering Materials. 2024. Т. 26. № 22. 2401100.

23. Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Kinematics of ultrasonic processing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol, 07–11 september 2020. Sevastopol, 2020. 022054. DOI: 10.1088/1757-899X/971/2/022054.

24. Рахимьянов Х. М., Гилета В. П., Самуль А. Г. Обеспечение микрогеометрического состояния поверхности деталей, выполненных из пластичных материалов, ультразвуковой обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 6. С. 256–259. DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-6-256-259.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Зеленина Анна Владимировна, аспирант, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20), e-mail: zelenina.2018@corp.nstu.ru

Гилета Виктор Павлович, доцент, Новосибирский государственный технический университет, (630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20), кандидат технических наук, e-mail: v.gileta@corp.nstu.ru

Самуль Артем Геннадьевич, Новосибирский государственный технический университет, (630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20), кандидат технических наук, e-mail: samul.2012@corp.nstu.ru

Иванова Алина Владиславовна, аспирант, Новосибирский государственный технический университет, (630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20), e-mail: a.v.ivanova.2018@corp.nstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Зеленина Анна Владимировна – постановка цели и задач исследования, обзор литературы, проведение обработки образцов и измерений, анализ данных, написание текста.

Гилета Виктор Павлович – постановка цели и задач исследования, написание текста.

Самуль Артем Геннадьевич – постановка цели и задач исследования, обзор литературы, проведение обработки образцов и измерений, анализ данных, написание текста.

Иванова Алина Владиславовна – постановка цели и задач исследования, обзор литературы, проведение измерений, анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

EFFECT OF THE LUBRICANT COMPOSITION ON THE SURFACE LAYER QUALITY OF TITANIUM ALLOY PARTS DURING ULTRASONIC SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Anna V. Zelenina *, Victor P. Gileta,
Artyom G. Samul, Alina V. Ivanova

Novosibirsk State Technical University

* for correspondence: zelenina.2018@stud.nstu.ru



Article info

Received:

18 April 2025

Accepted for publication:

22 September 2025

Accepted:

30 September 2025

Published:

23 October 2025

Keywords: titanium alloys,
plastic deformation, roughness,
microhardness, surface quality.

Abstract.

The features of titanium alloys, which are the basis of their distribution in various fields of industry, also lead to various difficulties in their processing, both by cutting and plastic deformation. This requires a more detailed study of the interaction of the part material, lubricant, and tool during the machining process. The work is devoted to determining the effect of ultrasonic surface plastic deformation (USSPD) on the formation of a stable microgeometric and physico-mechanical state of the surface layer (SL) of parts made of VT3-1 titanium alloy. An assessment was made of the influence of lubricating and cooling technological means (LCTM) on the USSPD process for the material in question, after which recommendations were given on their selection to obtain the necessary surface characteristics of the part. The analysis of the effect of the static load on the parameters of the surface layer obtained after processing of the USSPD is carried out. Various classes of products (liquid, grease) were considered as lubricants. It has been established that the use of ultrasonic surface-plastic deformation according to a tangential scheme using various lubricants ensures the formation of a stable regular microrelief with a cellular structure on parts made of titanium alloy VT3-1. At the same time, there is a decrease in the height-pitch characteristics of the roughness and an increase in the bearing capacity of the surface. The use of ultrasonic surface plastic deformation also made it possible to increase the microhardness of the surface layer by 25%. At the same time, the frequency of changes in the amount of increase in microhardness and decrease in roughness depends on the applied lubricant composition. It is established that the magnitude of the change in the parameters under consideration also depends on the static force applied during processing.

For citation: Zelenina A.V., Gileta V.P., Samul A.G., Ivanova A.V. Effect of the lubricant composition on the surface layer quality of titanium alloy parts during ultrasonic surface plastic deformation. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 5(171):17-28. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-17-28, EDN: RSYKOX

REFERENCES

1. Makarov V.F. Cutting materials: a textbook. Perm: PNRPU Publ.; 2009. 364 p.
2. Parfeneva I.E. Technology of structural materials. Moscow: Textbook; 2009. 84 p.
3. Kim V.A., Mokritsky Ya.B., Samar E.V., Yakubov C.F. Adhesive processes of contact interaction when cutting materials. *Scientific Notes of KnAGTU*. 2018; 11(33):66–75.
4. Papshev D.D. Finish Machining and Strengthening Treatment while Using Surface Plastic Deformation. Moscow: Mashinostroenie; 1978. Publ. 152 p. (in Russian)
5. Odintsov L.G. Strengthening and Finishing of Parts while Using Surface Plastic Deformation. Moscow: Mashinostroenie; 1987. Publ. 328 p. (in Russian)
6. Vishnepolsky E.V., Pavlenko D.V. Efficiency of compaction of non-compact alloys by diamond smoothing. *Nauka i tehnika = Science and Technology*. 2019; 18(1):62–69. DOI: 10. 21122/2227-1031-2019-18-1-62-69. (In Russian)
7. Garkunov D.N., Melnikov E.L., Gavrilyuk V. S. Tribotechnics: A textbook for university students studying in the areas of training "Automated technologies and production", "Design and technological support of machine-building industries". 2nd edition,

stereotypical. Moscow: KnoRus Company, 2017. 408 p. (In Russian)

8. Ye C., Zhou X., Telang A., Gao H., Ren Z., Qin H., Vasudevan V. K. Surface amorphization of NiTi alloy induced by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification for improved mechanical properties. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2016; 53:455–462.

9. Fan K., Liu D., Zhou K., Liu Y., Zhang H., Zhang X., ... & Wahab M. A. Enhanced fretting fatigue strength of TC11 titanium alloy using laser-assisted ultrasonic surface rolling process. *Tribology International*. 2024; 195:109619.

10. Klimenov V.A., Nekhoroshkov O.N., Uvarin P.V., Ivanov Yu.F. Ultrasonic finishing treatment as a method for obtaining nanocrystalline structures. *Physics of ultradisperse (nano-) systems. Materials of the VI All-Russian (International) Conference*. Moscow: MEPhI; 2002. (In Russian)

11. Klimenov V. A., Kovalevskaya Zh. G., Uvarin P.V. [et al.] Ultrasonic modification of the surface and its effect on the properties of coatings. *Physical mesomechanics*. 2004; 7(S1-2):157–160. (In Russian)

12. Zha X., Qin H., Yuan Z., Xi L., Chen X., Li Y., ... & Jiang F. Surface integrity and fatigue properties of Ti–6Al–4V alloy under the ultrasonic surface rolling process excited strain rate effect. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025; 35:416–434.

13. Zhang K.M., Liu S., Wang J., Sun Z. X., Liu W.J., Zhang C.C., Zhang X.C. Effect of high-frequency dynamic characteristics in the ultrasonic surface rolling process on the surface properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2024; 327:118353.

14. Klimenov V.A., Vlasov V.A., Borozna V.Y., Klopotov A.A. Ultrasonic Surface Treatment of Titanium Alloys. the Submicrocrystalline State. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Yurga, 21–23 may 2015. Yurga: Institute of Physics Publishing; 2015. 012040. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012040.

15. Borozna V.Yu. The influence of ultrasonic surface treatment on the structure and properties of titanium alloys. *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) = Mining*

information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2010; S3:341–349. (In Russian)

16. Borozna V., Zaitsev K., Klimenov V. Influence of ultrasonic superficial processing on properties of titanic alloys. In *METAL 2009-18th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2009. Pp. 273–278.

17. Zaitsev K.V., Aralkin A.S. The use of ultrasound in the processing of carbon steels and titanium alloys. *Modern Problems of Science and Education. Surgery*. 2014; 3:94. (In Russian)

18. Sydorenko S.I., Voloshko S.M., Kotenko I.E., Burmak A.P. Deformation formation of nanostructured composites on the surface of $\pi 16$ aluminium alloy. *Metal physics and the latest technologies*. 2012; 34(8):1101–1115.

19. Zhang K.M., Liu S., Wang J., Sun Z.X., Liu W.J., Zhang C.C., Zhang X.C. Effect of high-frequency dynamic characteristics in the ultrasonic surface rolling process on the surface properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2024; 327:118353.

20. Zheng K., Zhao X., Pan L., Ren Z. Ultrasonic rolling strengthening of TC11 titanium alloy surface: corrosion and wear properties under extreme conditions. *Wear*. 2024; 550:205415.

21. Luo X., Ren X., Qu H., Hou H. The effect of temperature on the deformed layer in the Ti6Al4V alloy subjected to the ultrasonic surface rolling process. *Materials Today Communications*. 2025. 112129.

22. Yang Y., Huang T., Ye C., Ding H. Recent Progress in Ultrasonic Surface Rolling: A Comprehensive Overview. *Advanced Engineering Materials*. 2024; 26(22):2401100.

23. Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Kinematics of ultrasonic processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol*, 07–11 september 2020. Sevastopol, 2020. 022054. DOI: 10.1088/1757-899X/971/2/022054.

24. Rakhimyanov Kh.M., Gileta V.P., Samul A.G. Assurance of microgeometric state of parts surface made of plastic materials by ultrasonic machining. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening technologies and coatings*. 2020; 6(16):256–259. (In Russian)

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

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Anna V. Zelenina, Postgraduate student, Novosibirsk State Technical University (20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia), e-mail: zelenina.2018@corp.nstu.ru

Viktor P. Gileta, Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, (20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia), Candidate of Technical Sciences, e-mail: v.gileta@corp.nstu.ru

Artyom G. Samul, Novosibirsk State Technical University, (20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia), Candidate of Technical Sciences, e-mail: samul.2012@corp.nstu.ru

Alina V. Ivanova, Postgraduate student, Novosibirsk State Technical University, (20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia), e-mail: a.v.ivanova.2018@corp.nstu.ru

Contribution of the authors:

Zelenina Anna Vladimirovna – setting goals and objectives for research, reviewing literature, processing samples and measurements, analyzing data, writing text.

Gileta Viktor Pavlovich – setting goals and objectives, research, writing text.

Samul Artyom Gennadievich – setting goals and objectives research, literature review, sample processing and measurements, data analysis, writing text.

Ivanova Alina Vladislavovna – setting goals and objectives research, literature review, measurement, data analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.

