

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 621.9.048.6

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-33-44

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6

Иванова Алина Владиславовна*, Зеленина Анна Владимировна,
Гилета Виктор Павлович

Новосибирский государственный технический университет

* для корреспонденции: a.v.ivanova.2018@corp.nstu.ru



Информация о статье

Поступила:

09 июня 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 сентября 2026 г.

Принята к публикации:

15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:

ультразвуковое упрочнение,
алюминиевые сплавы,
поверхностное пластическое
деформирование, качество
поверхности

Аннотация.

Развитие авиационной и космической промышленности невозможно без повышения эксплуатационных свойств деталей из алюминиевых сплавов, которое может быть обеспечено методами поверхностного пластического деформирования (ППД), в том числе с сообщением индентору высокочастотных колебаний. В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния режимов ультразвукового поверхностного пластического деформирования (УЗПД), а именно статической нагрузки, подачи и амплитуды ультразвуковых колебаний, на параметры качества поверхностного слоя образцов из алюминиевого сплава АМг6. Установлено, что ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование позволяет снижать шероховатость поверхности Ra до 4 раз, повышать микротвердость на 31,49%, а также повышать относительную опорную длину профиля в 2,5 раза и формировать на поверхности детали специфическую ячеистую топографию, обладающую повышенной маслостойкостью и несущей способностью. Технологически рациональными параметрами, обеспечивающими одновременно и значительное снижение шероховатости, и повышение микротвердости, являются нагрузка 50 Н и подача 0,107 мм/об. Изменение амплитуды ультразвуковых колебаний в исследованном диапазоне ($A = 5 \dots 15$ мкм) оказывает незначительное влияние как на высотные параметры шероховатости, так и на микротвердость поверхности. При этом уже минимальной величины амплитуды $A = 5$ мкм оказывается достаточно для сглаживания первоначальных неровностей поверхности. Полученные результаты исследования позволяют обоснованно назначать режимы УЗПД для повышения эксплуатационных характеристик деталей из алюминиевых сплавов на примере сплава АМг6, а также могут служить основой для дальнейшего изучения влияния амплитуды ультразвуковых колебаний на глубину упрочненного слоя.

Для цитирования: Иванова А.В., Зеленина А.В., Гилета В.П. Влияние режимов ультразвукового поверхностного пластического деформирования на качество поверхностного слоя деталей из алюминиевого сплава АМг6 // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 4 (176). С. 33-44. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-33-44, EDN: IYRJS

Введение

Улучшение эксплуатационных свойств деталей машин, в частности, из алюминиевых сплавов – приоритетная задача в авиа-, судо- и машиностроении. Основной причиной выхода из строя таких изделий часто служит разрушение поверхностного слоя под действием циклических и контактных нагрузок. Качество поверхностного слоя деталей, определяемое совокупностью геометрических параметров и физико-механических характеристик, в значительной степени формируется на финишных этапах технологического процесса изготовления. Именно эти характеристики оказывают наибольшее влияние на эксплуатационные свойства деталей: износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и контактную жесткость сопрягаемых поверхностей. Традиционные методы финишной обработки, такие как лезвийная обработка (точение, фрезерование) и абразивная обработка (шлифование, хонингование, суперфиниширование), обеспечивают улучшение геометрических параметров поверхности, но не всегда способны одновременно обеспечить и высокую твердость, и низкую шероховатость поверхностного слоя. Это обуславливает необходимость поиска новых и совершенствования существующих альтернативных технологических методов финишной обработки.

Таким направлением является применение методов поверхностного пластического деформирования (ППД), которые позволяют не только сгладить микронеровности и повысить твердость поверхностного слоя, но и создать в нем благоприятные сжимающие напряжения, препятствующие зарождению усталостных трещин [1–3]. Данный метод основан на наложении на деформирующий инструмент (индентор) высокочастотных ультразвуковых колебаний, что в свою очередь преобразует условия контакта инструмента с заготовкой с постоянного на циклическое. Сочетание постоянного статического давления и динамических нагрузок способствует облегчению условий течения металла: позволяет дислокациям в кристаллической решетке преодолевать энергетические барьеры, а локальный нагрев в зоне дефектов решетки повышает подвижность дислокаций, интенсифицируя процесс пластической деформации [3–4].

Благодаря этому УЗПД обладает рядом особенностей по сравнению с классическими статическими методами ППД, такими как обкатывание или алмазное выглаживание: высокая скорость деформации, снижение требуемого статического усилия прижима

деформатора, минимальный нагрев обрабатываемой поверхности, что особенно важно для материалов, чувствительных к структурно-фазовым изменениям [3–7]. В зависимости от направления колебаний инструмента различают нормальную и тангенциальную схемы обработки. Для материалов средней и низкой твердости, к которым относится исследуемый алюминиевый сплав, наиболее целесообразным является применение тангенциальной схемы ввода колебаний, что позволяет избежать образования волн текучести на поверхности и получить более стабильные показатели качества поверхностного слоя [8–9].

Анализ проведенных исследований показывает, что основная часть работ по ППД посвящена металлам и сплавам с высокой и средней твердостью [10–15]. Работы, посвященные влиянию УЗПД на параметры качества поверхностного слоя пластичных алюминиевых сплавов, единичны [16–17], при этом систематизированных данных о влиянии режимных параметров (статической нагрузки, подачи, амплитуды колебаний) на комплекс показателей качества (шероховатость, микротвердость, морфология) для сплава АМг6 в настоящее время недостаточно. В связи с этим установление количественных и качественных закономерностей между режимами УЗПД обработки и качеством поверхностного слоя является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит расширить технологические возможности метода и повысить эффективность финишной обработки деталей из алюминиевых сплавов, а также поспособствует более широкому внедрению этого метода в производство.

Цель настоящей работы заключается в выявлении влияния параметров УЗПД (статической нагрузки, подачи, амплитуды колебаний) на формирование качества поверхностного слоя образцов из алюминиевого сплава АМг6.

Материалы и методы

Изучение влияния режимов УЗПД на качество поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов осуществлялось на цилиндрических образцах диаметром 50 мм.

Выбор алюминиевого сплава АМг6 в качестве объекта исследования обусловлен его широким применением в авиационной и космической промышленности. Сплав АМг6 относится к системе *Al-Mg* и является термически неупрочняемым, то есть повышение его прочностных характеристик возможно исключительно методами поверхностного пластического упрочнения. Сплав обладает высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной

стойкостью в агрессивных средах. Вместе с тем относительно невысокая твердость поверхностного слоя деталей из данного сплава обуславливает актуальность применения методов ППД, которые позволяют формировать требуемые физико-механические характеристики поверхностного слоя без изменения химического состава материала [18–19].

Исходная обработка образцов выполнялась точением, в результате были получены следующие характеристики: шероховатость Ra 0,679 мкм, микротвердость – 116 HV.

Для обработки методом УЗПД использовалась ультразвуковая колебательная система, включающая ультразвуковой генератор IL10 и магнитострикционный преобразователь. В качестве деформирующего инструмента применялся индентор из синтетического поликристаллического алмаза (типа АСПК) сферической формы с радиусом рабочей поверхности 3,5 мм. УЗПД осуществлялось по тангенциальной схеме ввода ультразвуковых колебаний, при которой вектор колебательной скорости индентора располагался коллинеарно и компланарно вектору скорости обработки. Скорость обработки, согласно литературным данным, оказывает незначительное влияние на исследуемые параметры качества поверхностного слоя [20–23], поэтому в исследовании она была принята постоянной и составила $v = 59$ м/мин, частота колебаний $f = 20000 \pm 400$ Гц.

Другие параметры варьировались в следующих пределах:

s – подача 0,083–0,16 мм/об;

P – статическая нагрузка в диапазоне 25 – 100 Н;

A – амплитуда ультразвуковых колебаний в диапазоне 5–15 мкм.

Оценка шероховатости обработанной поверхности выполнялась с помощью контактного профилометра *MarSurf PS*. Анализ проводился по следующим параметрам: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля; tp – относительная опорная длина профиля (отношение длины участка профиля, заполненного материалом, к общей длине оцениваемого участка). Для обеспечения достоверности результатов экспериментов измерения выполнялись не менее десяти раз с последующим статистическим усреднением.

Для визуализации и качественного анализа микрогеометрии, а также оценки топографии обработанной поверхности применялся метод бесконтактной оптической профилометрии с использованием интерференционного микроскопа белого света *Zygo NewView 7300*. Данный метод позволяет получать трехмерные изображения поверхности и проводить детальный анализ ее строения.

Определение микротвердости производилось по методу Виккерса в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76 [24]. Испытания выполнялись на микротвердомере путем вдавливания алмазного индентора (четырёхгранная пирамида с углом при вершине 136°) в исследуемую поверхность. Нагрузка на индентор составляла 0,5 Н, время выдержки под

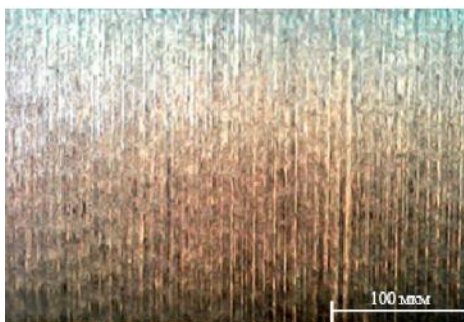


Рис. 1. Исходное состояние поверхности перед ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием

Fig. 1. Initial state of the surface before ultrasonic surface plastic deformation

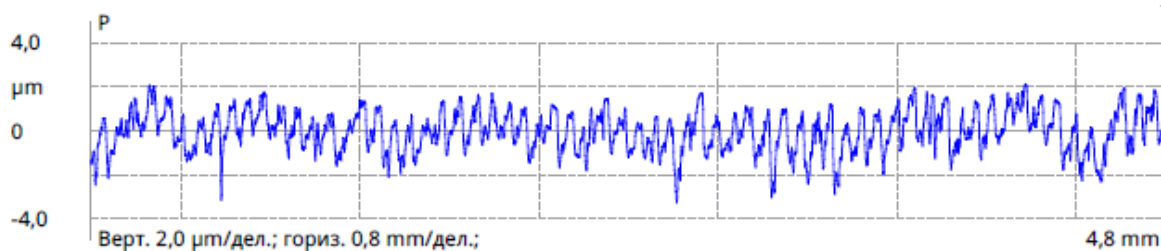


Рис. 2. Профилограмма исходной поверхности перед ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием

Fig. 2. Profilogram of the original surface before ultrasonic surface plastic deformation

нагрузкой – 10 секунд.

Степень упрочнения поверхностного слоя после обработки оценивалась по отношению прироста микротвердости к исходному значению, выраженному в процентах.

Результаты и обсуждения

На Рис. 1 и 2 представлена морфология и профилограмма исходного состояния поверхности образца после предварительного точения перед проведением обработки ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием. На обточенной поверхности отчетливо видны следы обработки в виде регулярных бороздок, характерные для обработки резанием.

Влияние статической нагрузки на качество поверхностного слоя при УЗПД

Влияние статической нагрузки на качество поверхностного слоя оценивалось при ее изменении в диапазоне ($P = 25 \dots 100$ Н) при неизменном значении остальных параметров ($s = 0,107$ мм/об, $A = 15$ мкм).

Топография поверхности после обработки УЗПД представлена на Рис. 3.

На всех снимках поверхности видно, что при УЗПД формируется специфическое ячеистое строение поверхности. Оно образуется из-за периодических ударных воздействий индентора, колеблющегося с ультразвуковой частотой, на обрабатываемую поверхность материала, в результате чего формируется регулярный микрорельеф в виде чередующихся лунок. Формирование ячеистой топографии является характерной особенностью УЗПД и отличает его от других методов ППД, для которых характерно формирование полосчатой структуры. Ячеистая морфология дает повышенную маслосъемность и формирует поверхность с высокой несущей способностью.

С увеличением нагрузки возрастает и контактное давление инструмента на поверхность обрабатываемой детали, что приводит к более интенсивному пластическому течению материала, и поэтому наблюдается появление волн. Образование волн на поверхности образца происходит при нагрузках выше 50 Н.

В Таблице 1 представлены параметры

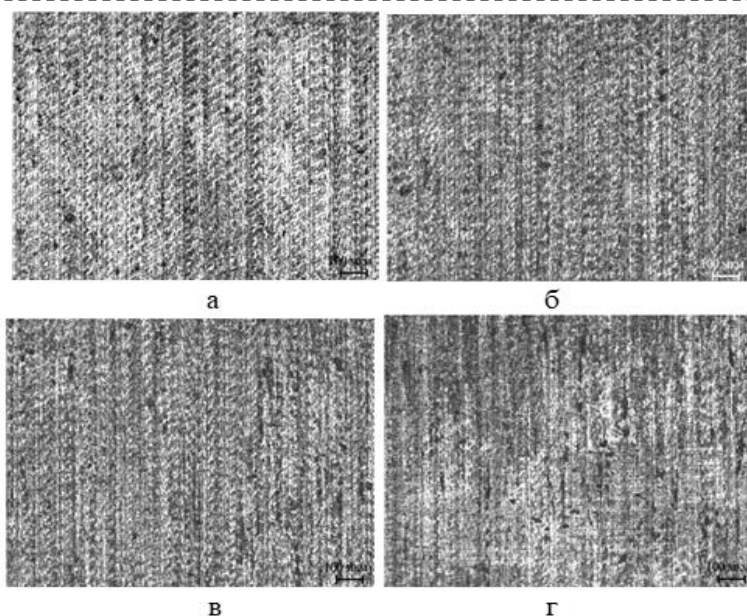


Рис. 3. Морфология поверхности после УЗПД при $s = 0,107$ мм/об

$a - P = 25$ Н, $б - P = 50$ Н, $в - P = 75$ Н, $г - P = 100$ Н

Fig. 3. Surface morphology after ultrasonic PD at $s = 0.107$ mm/rev

$a - P = 25$ N, $б - P = 50$ N, $в - P = 75$ N, $г - P = 100$ N

Таблица 1. Зависимость шероховатости Ra и относительной опорной длины t_{20} от нагрузки при УЗПД
Table 1. Dependence of roughness Ra and relative support length t_{20} on the load during USPD

Вид обработки	P , Н	Ra , мкм	t_{20} , %	$Ra_{исх}/Ra$	$t_{20}/t_{20исх}$
Исходная	-	0,679	38,73	-	-
УЗПД	25	0,231	95,55	2,938	2,46
УЗПД	50	0,173	99,23	3,925	2,56
УЗПД	75	0,152	99,87	4,454	2,57
УЗПД	100	0,161	99,88	4,226	2,57

шероховатости поверхности образца из АМгб.

С ростом усилия P до 75 Н значение Ra снижается, дальнейшее увеличение статического усилия приводит к росту Ra . Относительная опорная длина профиля значительно увеличивается уже при 25 Н и с ростом нагрузки остается на стабильно высоком уровне.

В Таблице 2 представлены данные по изменению значения микротвердости обработанной поверхности в зависимости от нагрузки P .

Наибольший прирост микротвердости наблюдается при $P = 50$ Н. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к разупрочнению поверхностного слоя, а также к повышению параметров шероховатости, что может негативно сказываться на износостойкости поверхности.

Влияние подачи на качество поверхностного слоя

Влияние подачи на параметры качества поверхностного слоя было изучено при ее изменении ($s = 0,083...0,16$ мм/об) при неизменном значении остальных режимов ($P = 50$ Н, $A = 15$ мкм).

На Рис. 4 представлены топограммы поверхности после УЗПД при разных значениях подачи.

Наиболее четко ячеистая структура отслеживается при значениях подачи до 0,107 мм/об. Неровности поверхности не имеют ярко выраженной острой формы, что обычно положительно сказывается на износостойкости поверхности. На Рис. (г) и (д) довольно отчетливо видно, что борозды становятся

Таблица 2. Зависимость микротвердости поверхности образцов от нагрузки при УЗПД
Table 2. Dependence of the microhardness of the sample surface on the load during USPD

Вид обработки	P , Н	HV , МПа	ΔHV , %
Исходная	-	116	-
УЗПД	25	142	22,23
УЗПД	50	153	31,49
УЗПД	75	134	15,88
УЗПД	100	129	11,64

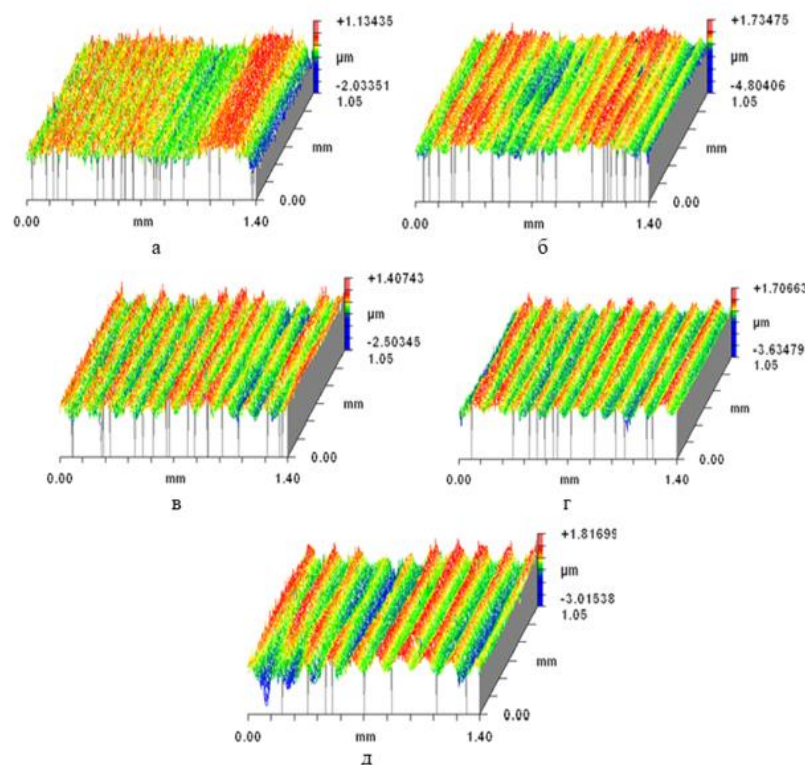


Рис. 4. Топограммы поверхности после УЗПД при $P = 50$ Н

$a - s = 0,078$ мм/об, $б - s = 0,107$ мм/об, $в - s = 0,129$ мм/об, $г - s = 0,142$ мм/об, $д - s = 0,16$ мм/об

Fig. 4. Surface topograms after USPD at $P = 50$ N

$a - s = 0.078$ mm/rev, $б - s = 0.107$ mm/rev, $в - s = 0.129$ mm/rev, $г - s = 0.142$ mm/rev, $д - s = 0.16$ mm/rev

глубже, и высота неровностей поверхности, соответственно, повышается.

При увеличении подачи при УЗПД снижается относительная опорная длина профиля t_{20} со значения 99,9% для подачи 0,083 мм/об до 68,25% для подачи 0,16 мм/об. Шаг локальных неровностей растет с увеличением подачи – с 33,35 мкм для подачи 0,083 мм/об до 110,32 мкм

Микротвердость поверхности образца имеет максимальное значение при подаче, соответствующей 0,107 мм/об. Дальнейшее увеличение подачи приводит к снижению и стабилизации микротвердости. Такое поведение также связано со степенью перекрытия следов обработки УЗПД. При малых подачах степень перекрытия выше, что дает многократное

Таблица 3. Зависимость шероховатости Ra и микротвердости поверхности образцов от подачи при УЗПД

Table 3. Dependence of roughness Ra and microhardness of the surface of samples on the feed rate during USPD

Вид обработки	P , Н	Ra , мкм	t_{20} , %	$Ra_{исх}/Ra$	$t_{20}/t_{20исх}$
Исходная	-	0,679	38,73	-	-
УЗПД	25	0,231	95,55	2,938	2,46
УЗПД	50	0,173	99,23	3,925	2,56
УЗПД	75	0,152	99,87	4,454	2,57
УЗПД	100	0,161	99,88	4,226	2,57

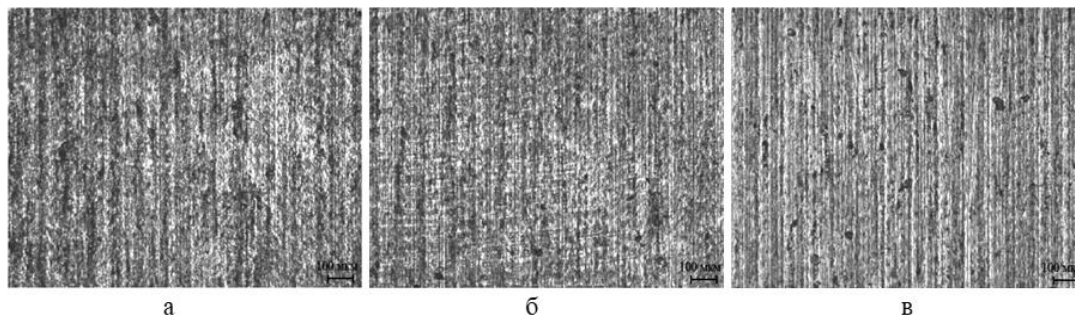


Рис. 5. Морфология поверхности после УЗПД при $P = 50$ Н, $s = 0,107$ мм/об
а – амплитуда $A = 5$ мкм, б – амплитуда $A = 10$ мкм, в – амплитуда $A = 15$ мкм
Fig. 5. Surface morphology after USPD at $P = 50$ N, $s = 0,107$ mm/rev
а – amplitude $A = 5$ μ m, б – amplitude $A = 10$ μ m, в – amplitude $A = 15$ μ m

при подаче 0,16 мм/об.

В Таблице 3 представлены данные по изменению параметра Ra и значения микротвердости обработанной поверхности в зависимости от подачи при УЗПД.

С увеличением подачи наблюдается рост высотных параметров шероховатости поверхности. Тем не менее, даже при максимальных значениях подачи в исследованном диапазоне шероховатость поверхности после УЗПД остается значительно ниже, чем после предшествующего точения, что подтверждает высокую эффективность данного метода как финишной операции для деталей из алюминиевого сплава АМгб.

В диапазоне подач от 0,083 мм/об до 0,129 мм/об величина градиента изменения Ra уменьшается и практически остается неизменной. Относительная опорная длина сначала возрастает, но при подачах выше 0,107 мм/об начинает снижаться.

воздействие инструмента на одни и те же участки поверхности и способствует накоплению пластической деформации. С увеличением подачи степень перекрытия уменьшается, и снижается интенсивность упрочнения, что приводит к снижению микротвердости поверхности.

Влияние амплитуды на качество поверхностного слоя при УЗПД

Влияние амплитуды на качество поверхностного слоя образцов было изучено при ее изменении в диапазоне от 5 до 15 мкм при неизменном значении остальных параметров при УЗПД. Подача $s = 0,107$ мм/об, статическая нагрузка $P = 50$ Н.

Топография поверхности при варьировании параметром подачи представлена на Рис. 5.

На каждой фотографии поверхности независимо от значения амплитуды прослеживается наличие ячеистого строения поверхностного слоя, характерного для метода

УЗПД. Визуально высота неровностей не отличается.

На Рис. 6 представлены профилограммы, на которых видно, что шероховатость поверхности остается практически неизменной. Впадины не имеют острой формы, что также характерно для метода ультразвукового поверхностного пластического деформирования.

Наибольшее значение шероховатости $Ra = 0,281$ мкм наблюдается при $A = 10$ мкм, что ниже Ra исходного состояния в 2,5 раза.

На графике, представленном на Рис. 7, наглядно видно, что в зависимости от изменения

амплитуды шероховатость изменяется в узком интервале значений, который значительно ниже, чем исходное значение $Ra_{исх.}$. Это говорит о том, что изменение амплитуды в диапазоне от 5 до 15 мкм влияет на микрогеометрию поверхности незначительно, и уже первого уровня амплитуды $A = 5$ мкм было достаточно для смятия высоты первоначальных выступов.

На Рис. 8 представлена зависимость микротвердости поверхности от амплитуды. Уровень упрочнения в диапазоне амплитуды от 5 до 15 мкм изменяется незначительно (практически не изменяется).

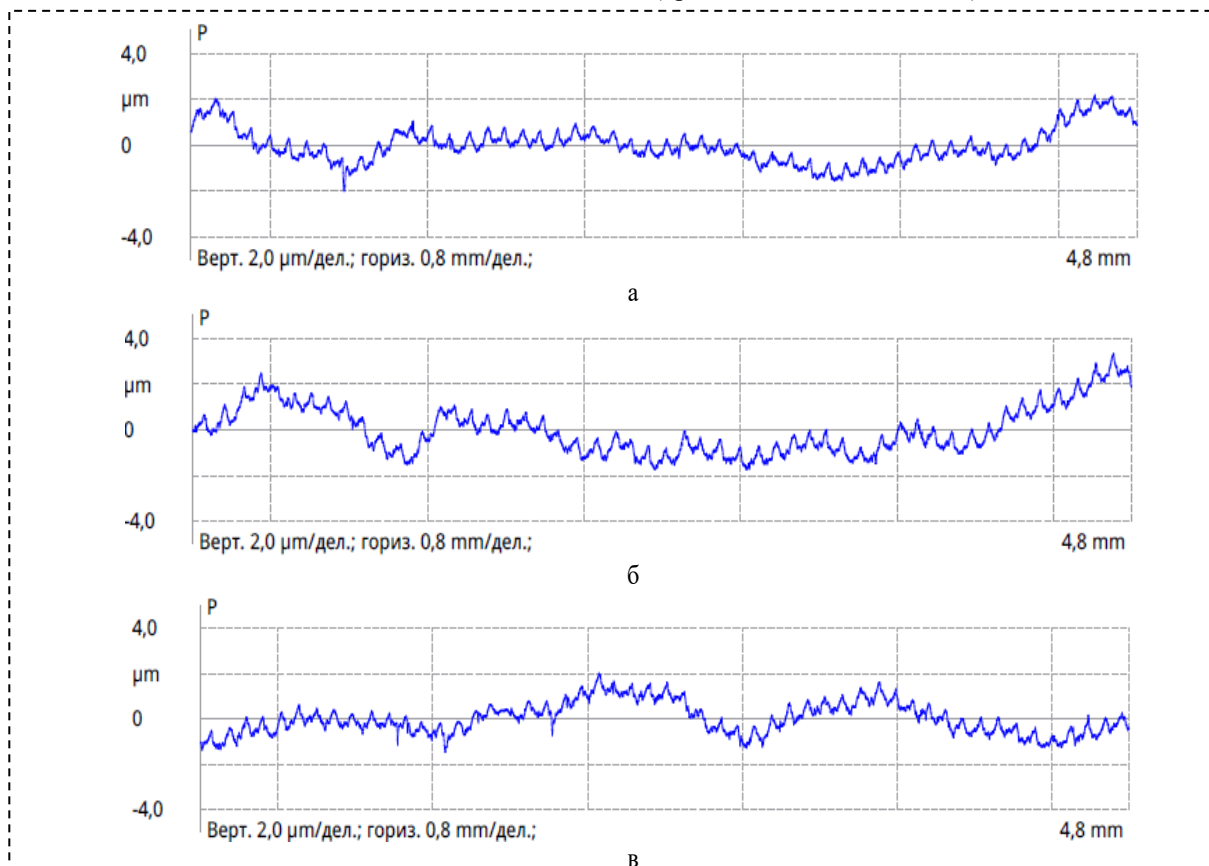


Рис. 6. Профилограммы обработанной поверхности при амплитуде: а – 5 мкм, б – 10 мкм, в – 15 мкм
Fig. 6. Profilograms of the treated surface with an amplitude of: а – 5 μm , б – 10 μm , в – 15 μm

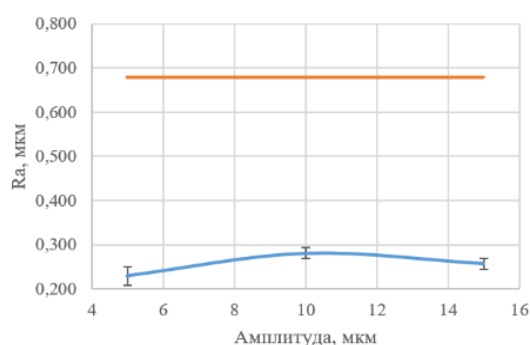


Рис. 7. Зависимость параметра Ra от амплитуды
Fig. 7. Dependence of the parameter Ra on the amplitude

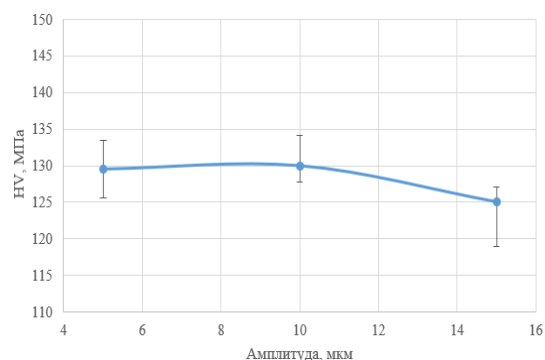


Рис. 8. Зависимость микротвердости от амплитуды
Fig. 8. Dependence of microhardness on amplitude

Вероятно, с изменением амплитуды колебаний, наложенных на инструмент, изменится глубина упрочнения, а не микрогеометрические параметры качества поверхностного слоя.

Выводы

В данной работе проведено экспериментальное исследование влияния режимных параметров ультразвукового поверхностного пластического деформирования (статической нагрузки, подачи и амплитуды колебаний) на параметры качества поверхностного слоя образцов из алюминиевого сплава АМг6. Установлено, что статическая нагрузка оказывает значительное влияние на формируемое качество поверхности. Рациональным значением, обеспечивающим максимальное снижение шероховатости практически в 4 раза ($R_a = 0,173$ мкм) и наибольший градиент прироста микротвердости, является нагрузка 50 Н.

При превышении данного значения наблюдается снижение микротвердости поверхности образца, при дальнейшем увеличении нагрузки возрастает шероховатость, а на поверхности образуются волны, что свидетельствует о чрезмерной интенсивности деформационного воздействия. Относительная опорная длина профиля t_{20} сохраняется на стабильно высоком уровне (до 99,89%) в широком диапазоне нагрузок, что говорит о формировании после УЗПД поверхности с высокими несущими свойствами.

Увеличение подачи в диапазоне 0,083–0,16 мм/об приводит к росту высотных параметров шероховатости и снижению относительной опорной длины профиля (с 99,9% до 68,3%). Максимальное упрочнение поверхностного слоя достигается при подаче 0,107 мм/об ($\Delta H_V = 31,49\%$), что объясняется рациональной степенью перекрытия следов инструмента и накоплением пластической деформации. Таким образом, рациональными по совокупности исследованных параметров качества являются значения нагрузки $P = 50$ Н и подачи $s = 0,107$ мм/об.

Изменение амплитуды ультразвуковых колебаний в исследованном диапазоне ($A = 5 \dots 15$ мкм) оказывает незначительное влияние как на высотные параметры шероховатости, так и на микротвердость поверхности. При этом уже минимальной амплитуды $A = 5$ мкм оказывается достаточно для сглаживания первоначальных неровностей поверхности. Это позволяет предположить, что основное влияние величины амплитуды проявляется в изменении глубины упрочненного слоя, а не в формировании микрогеометрии поверхности.

Установленные закономерности влияния параметров УЗПД на качество поверхностного слоя позволяют обоснованно назначать технологические режимы обработки деталей из алюминиевого сплава АМг6 с учетом необходимых требований, как по микрогеометрическим параметрам поверхности, так и по физико-механическим характеристикам поверхностного слоя. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов финишной обработки деталей авиационных и космических конструкций. Изучение влияния амплитуды ультразвуковых колебаний на параметры шероховатости и микротвердость может служить основой для дальнейших исследований, в частности для изучения взаимосвязи амплитуды с глубиной упрочненного слоя и распределением остаточных напряжений по глубине, что позволит получить более полную картину формирования поверхностного слоя в процессе УЗПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев Д. Л. Технология и оборудование станко-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием : автореф. дис. ... д-р. техн. наук : 05.02.08. Орел, 2005. 28 с.
2. Матлин М. М., Мозгунова А. И., Лебский С. А. Прогнозирование параметров упрочнения деталей машин путем поверхностного пластического деформирования // Известия ВолГТУ. Волгоград : ВолГТУ, 2014. С. 4.
3. Кувшинов М. О., Хлыбов А. А. Сравнительный анализ методов поверхностного пластического деформирования (ППД) // XVIII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых. Екатеринбург, 2017. № 18. С. 37–42.
4. Maximov J. [et al.] Effect of roller burnishing and slide roller burnishing on surface integrity of AISI 316 steel: theoretical and experimental comparative analysis // Machines. 2024. Vol. 12. № 1. P. 51.
5. Huang P. [et al.] Effect of ultrasonic rolling on surface integrity, machining accuracy, and tribological performance of bearing steels under different process schemes // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2023. Vol. 43. Pp. 143–157.
6. Luan X. [et al.] Experimental study on surface integrity of ultra-high-strength steel by ultrasonic hot rolling surface strengthening // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 392. Art. 125745.
7. Григорьев С. Н., Табаков В. П., Волосова М. А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. Старый Оскол : ТНТ, 2011. 380 с.
8. Жилина Д. А. Ультразвуковая обработка металлов // Оригинальные исследования. 2022. Т. 12. № 12. С. 237–242.
9. Самуль А. Г. [и др.] Выбор рациональной

схемы ультразвуковой обработки для конструкционных материалов средней твердости // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2020) : сб. тр. конф. 2020. С. 111–116.

10. Зайдес С. А., Као Н. Влияние новой кинематики обкатного ролика на качество упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 2 (695). С. 58–67.

11. Нгуен Ван Хинь. Технологические основы отделочно-упрочняющей обработки осциллирующим выглаживанием : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. Иркутск, 2019. 150 с.

12. Lv L. [et al.] Gradient microstructure evolution of high-strength alloy steel induced by shot peening // Mechanics of Materials. 2025. Art. 105472.

13. Sun H., Si C., Wang J. Effect of ultrasonic shot peening on the microstructure, surface residual stress, and wear properties of Ti-6Al-4V alloy // Surface Engineering. 2024. Vol. 40. № 11–12. Pp. 1098–1112.

14. Wang S. [et al.] Influence of Powder-Embedded Ultrasonic Shot Peening on the Coupled Mechanisms of Surface Structure and Tribological Behavior of 316L Stainless Steel // Journal of Materials Engineering and Performance. 2026. Pp. 1–13.

15. Lavrys S. M. [et al.] The influence of the initial structure of high-strength titanium alloy on surface hardening and roughness after ball burnishing // Materials Science. 2025. Vol. 60. № 6. Pp. 784–791.

16. Беляев В. Н., Савин И. И., Хмелев В. Н., Фирсов А. М., Цыганок С. Н. Качество поверхностного слоя при поверхностно-пластическом деформировании с наложением ультразвуковых колебаний // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении. Екатеринбург : УрФУ, 2002. С. 4.

17. Круглешов А. А. Ультразвуковая поверхностная обработка алюминиевых сплавов // Тезисы докладов 52-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. 2019. С. 158–159.

18. Шеметев Г. Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение. СПб. : Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012. 155 с.

19. Драчев В. В. Классификация и маркировка сплавов цветных металлов : учебно-методическое пособие. Кемерово : КузГТУ, 2016. 24 с.

20. Приходько В. М., Медеяев И. А., Фатюхин Д. С. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами : монография. М. : МАДИ, 2015. 264 с.

21. Букатый А. С., Швецов А. Н., Лунин В. В., Мухин А. Ю., Сараев А. С. Назначение режимов алмазного выглаживания деталей шасси на основе исследования остаточных напряжений // Управление движением и навигация летательных аппаратов : сб. тр. XXVI Всерос. семинара (Самара, 14–16 июня 2023 г.). Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2023. С. 278–283.

22. Liu Z. [et al.] Analytical modeling and experimental verification of surface roughness in the ultrasonic-assisted ball burnishing of shaft targets // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 107. № 7. Pp. 3593–3613.

23. Luo X. [et al.] Effects of ultrasonic surface rolling processing on the surface properties of 4Cr13 stainless steel // Metals and Materials International. 2024. Vol. 30. № 8. Pp. 2282–2295.

24. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Введ. 1977–01–01. М. : Издательство стандартов, 1993. 33 с.

© 2026 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:

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

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

Гилета Виктор Павлович, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения Новосибирского государственного технического университета, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия, e-mail: v.gileta@corp.nstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Иванова Алина Владиславовна – постановка цели и задач исследования, анализ полученных результатов, написание текста, анализ полученных результатов, анализ источников литературы, формулировка выводов.

Зеленина Анна Владимировна – постановка цели и задач исследования, анализ полученных результатов, написание текста, анализ полученных результатов, анализ источников литературы, формулировка выводов.

Гилета Виктор Павлович – постановка цели и задач исследования, анализ полученных результатов,

написание текста, анализ полученных результатов, анализ источников литературы, формулировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

THE INFLUENCE OF ULTRASONIC SURFACE PLASTIC DEFORMATION PARAMETERS ON THE SURFACE LAYER QUALITY OF PARTS MADE FROM AMG6 ALUMINUM ALLOY

Alina V. Ivanova*, Anna V. Zelenina, Viktor P. Gileta

Novosibirsk State Technical University

* for correspondence: a.v.ivanova.2018@corp.nstu.ru



Article info

Received:

09 June 2026

Accepted for publication:

01 September 2026

Accepted:

15 September 2026

Keywords: ultrasonic hardening, aluminum alloys, surface plastic deformation, surface quality

Abstract.

The development of the aviation and aerospace industry is impossible without improving the operational properties of aluminum alloy parts, which can be achieved by surface plastic deformation (SPD) methods, including those involving the transmission of high-frequency vibrations to the indenter. The paper presents the results of an experimental study on the influence of ultrasonic surface plastic deformation (USPD) parameters – namely static load, feed rate, and ultrasonic vibration amplitude – on the surface layer quality parameters of AMg6 aluminum alloy specimens. It has been established that ultrasonic surface plastic deformation allows reducing surface roughness R_a by up to 4 times, increasing microhardness by 31.49%, as well as increasing the relative bearing length of the profile by 2.5 times and forming a specific cellular surface topography with enhanced oil retention capacity and load-bearing capability. The technologically rational parameters ensuring both a significant reduction in roughness and an increase in microhardness are a load of 50 N and a feed rate of 0.107 mm/rev. Variation of the ultrasonic vibration amplitude within the studied range ($A = 5 \dots 15 \mu\text{m}$) has an insignificant effect on both the height roughness parameters and the surface microhardness. Moreover, the minimum amplitude value of $A = 5 \mu\text{m}$ proves sufficient for smoothing the initial surface irregularities. The obtained research results allow for the well-grounded assignment of USPD parameters to improve the operational characteristics of aluminum alloy parts using AMg6 alloy as an example, and may also serve as a basis for further investigation of the influence of ultrasonic vibration amplitude on the depth of the hardened layer.

For citation: Ivanova A.V., Zelenina A.V., Gileta V.P. The Influence of Ultrasonic Surface Plastic Deformation Parameters on the Surface Layer Quality of Parts Made from AMg6 Aluminum Alloy. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 4(176):33-44. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-33-44, EDN: IYRJS

REFERENCES

1. Solov'ev D.L. Tekhnologiya i oborudovanie stanko-impul'snoy obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniyem [Technology and equipment of machine-impulse surface plastic deformation treatment]: avtoref. dis. ... d-r. tekhn. nauk: 05.02.08. Orel; 2005. 28 p. (In Russ.)
2. Matlin M.M., Mozggunova A.I., Lebskiy S.A. Prognozirovaniye parametrov uprochneniya detaley mashin putem poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Prediction of hardening parameters of

machine parts by surface plastic deformation]. *Izvestiya VolgGTU*. 2014. P. 4. (In Russ.)

3. Kuvshinov M.O., Khlybov A.A. Sravnitel'nyy analiz metodov poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya (PPD) [Comparative analysis of surface plastic deformation methods]. XVIII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya Ural'skaya shkola-seminar metallovedov-molodykh uchenykh. Yekaterinburg. 2017; 18:37-42. (In Russ.)

4. Maximov J. [et al.] Effect of roller burnishing and slide roller burnishing on surface integrity of AISI 316

steel: theoretical and experimental comparative analysis. *Machines*. 2024; 12(1):51.

5. Huang P. [et al.] Effect of ultrasonic rolling on surface integrity, machining accuracy, and tribological performance of bearing steels under different process schemes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023; 43:143-157.

6. Luan X. [et al.] Experimental study on surface integrity of ultra-high-strength steel by ultrasonic hot rolling surface strengthening. *Surface and Coatings Technology*. 2020; 392. Art. 125745.

7. Grigor'ev S.N., Tabakov V.P., Volosova M.A. Tekhnologicheskiye metody povysheniya iznosostoykosti kontaktnykh ploshchadok rezhushchego instrumenta [Technological methods for improving the wear resistance of cutting tool contact pads]. Staryy Oskol: TNT; 2011. 380 p. (In Russ.)

8. Zhilina D.A. Ul'trazvukovaya obrabotka metallov [Ultrasonic metal treatment]. *Original'nyye issledovaniya*. 2022; 12(12):237-242. (In Russ.)

9. Samul' A.G. [et al.] Vybór ratsional'noy skhemy ul'trazvukovoy obrabotki dlya konstruktsionnykh materialov sredney tvyordosti [Selection of rational scheme of ultrasonic treatment for medium-hardness structural materials]. *Innovatsii v mashinostroyenii (InMash-2020): sbornik trudov*. 2020. Pp. 111-116. (In Russ.)

10. Zaydes S.A., Kao N. Vliyaniye novoy kinematiki obkatnogo rolíka na kachestvo uprochnyonnogo sloya pri poverkhnostnom plasticheskom deformirovanii [Influence of new roller kinematics on the quality of hardened layer in surface plastic deformation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2018; 2(695):58-67. (In Russ.)

11. Nguen Van Hin'. Tekhnologicheskiye osnovy otdelochno-uprochnyayushchey obrabotki ostsiliruyushchim vyglazhivaniyem [Technological fundamentals of finishing-hardening treatment by oscillating burnishing]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.08. Irkutsk; 2019. 150 p. (In Russ.)

12. Lv L. [et al.] Gradient microstructure evolution of high-strength alloy steel induced by shot peening. *Mechanics of Materials*. 2025. Art. 105472.

13. Sun H., Si C., Wang J. Effect of ultrasonic shot peening on the microstructure, surface residual stress, and wear properties of Ti-6Al-4V alloy. *Surface Engineering*. 2024; 40(11-12):1098-1112.

14. Wang S. [et al.] Influence of Powder-Embedded Ultrasonic Shot Peening on the Coupled Mechanisms of Surface Structure and Tribological Behavior of 316L Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2026. Pp. 1-13.

15. Lavrys S.M. [et al.] The influence of the initial structure of high-strength titanium alloy on surface hardening and roughness after ball burnishing. *Materials Science*. 2025; 60(6):784-791.

16. Belyaev V.N., Savin I.I., Khmelev V.N., Firsov A.M., Tsyganok S.N. Kachestvo poverkhnostnogo sloya pri poverkhnostno-plasticheskom deformirovanii s nalozheniyem ul'trazvukovykh kolebaniy [Surface layer quality in surface plastic deformation with ultrasonic vibrations superimposed]. *Resursosberegayushchiye tekhnologii v mashinostroyenii*. Yekaterinburg: UrFU; 2002. P. 4. (In Russ.)

17. Krugleshov A.A. Ul'trazvukovaya poverkhnostnaya obrabotka alyuminiyevykh splavov [Ultrasonic surface treatment of aluminium alloys]. *Tezisy dokladov 52-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley i studentov*. 2019. Pp. 158-159. (In Russ.)

18. Shemetev G.F. Alyuminiyevyye splavy: sostavy, svoystva, primeneniye [Aluminium alloys: compositions, properties, applications]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet; 2012. 155 p. (In Russ.)

19. Drachev V.V. Klassifikatsiya i markirovka splavov tsvetnykh metallov [Classification and marking of non-ferrous metal alloys]: uchebno-metodicheskoye posobiye. Kemerovo: KuzGTU; 2016. 24 p. (In Russ.)

20. Prikhod'ko V.M., Medejaev I.A., Fatyukhin D.S. Formirovaniye ekspluatatsionnykh svoystv detaley mashin ul'trazvukovymi metodami [Formation of operational properties of machine parts by ultrasonic methods]: monografiya. Moscow: MADI; 2015. 264 p. (In Russ.)

21. Bukatyy A.S., Shvetsov A.N., Lunin V.V., Mukhin A.Yu., Saraev A.S. Naznacheniye rezhimov almaznogo vyglazhivaniya detaley shassi na osnove issledovaniya ostatochnykh napryazheniy [Assignment of diamond burnishing modes for landing gear parts based on residual stress analysis]. *Upravleniye dvizheniyem i navigatsiya letatel'nykh apparatov: sb. tr. XXVI Vseros. Seminara*. Samara: Izd-vo Samar. un-ta; 2023. Pp. 278-283. (In Russ.)

22. Liu Z. [et al.] Analytical modeling and experimental verification of surface roughness in the ultrasonic-assisted ball burnishing of shaft targets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020; 107(7):3593-3613.

23. Luo X. [et al.] Effects of ultrasonic surface rolling processing on the surface properties of 4Cr13 stainless steel. *Metals and Materials International*. 2024; 30(8):2282-2295.

24. GOST 9450-76. Izmereniye mikrotvyordosti vdavlivaniyem almaznykh nakonechnikov [Measurement of microhardness by diamond indenter indentation]. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1993. 33 p. (In Russ.)

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

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

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

Viktor P. Gileta, Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk 630073, Russia, e-mail: v.gileta@corp.nstu.ru

Contribution of the authors:

Alina V. Ivanova – setting the goals and objectives of the study, analyzing the results obtained, writing the text, analyzing the results obtained, analyzing literature sources, and formulating conclusions.

Anna V. Zelenina – setting the goals and objectives of the study, analyzing the results obtained, writing the text, analyzing the results obtained, analyzing literature sources, and formulating conclusions.

Viktor P. Gileta – setting the goals and objectives of the study, analyzing the results obtained, writing the text, analyzing the results obtained, analyzing literature sources, and formulating conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

