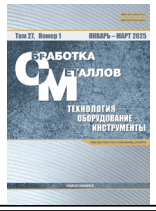
Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 1 с. 77–92
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-77-92

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние угла наклона колебательной системы на поверхностные свойства стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании

Дмитрий Фатюхин [1, a, *], ***Равиль Нигметзянов*** [2, b], ***Вячеслав Приходько*** [3, c], ***Сергей Сундуков*** [4, d], ***Александр Сухов*** [5, e]

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

[a] https://orcid.org/0000-0002-5914-3415, mitriy2@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0009-0008-1443-7584, lefmo@yandex.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-8261-0424, prikhodko@madi.ru; [d] https://orcid.org/0000-0003-4393-4471, sergey-lefmo@yandex.ru;
[e] https://orcid.org/0009-0009-9097-8216, sukhov-aleksandr96@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 534-8 + 621.9.048.6

История статьи:
Поступила: 22 ноября 2024
Рецензирование: 03 декабря 2024
Принята к печати: 03 февраля 2025
Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:
Ультразвук
Поверхностный слой
Ультразвуковые колебания
Поверхностное деформирование
Шероховатость
Микротвердость

Финансирование
Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту Российского научного фонда № 24-19-00463, https://rscf.ru/project/24-19-00463/.

АННОТАЦИЯ

Введение. Среди способов модификации поверхностей металлических изделий, позволяющих изменить физико-механические и геометрические свойства поверхностного слоя, наиболее распространены способы поверхностного пластического деформирования (ППД). Использование ультразвука для повышения эффективности деформационных процессов позволяет повысить микротвердость и снизить шероховатость по сравнению с обкатыванием и выглаживанием. Наибольшие технологические сложности вызывает ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование криволинейных поверхностей, в том числе полученных аддитивными технологиями. Учитывая, что большинство способов ультразвукового ППД основано на продольном характере колебаний, для обеспечения равномерной обработки криволинейных поверхностей ось инструмента должна быть направлена под заданным углом к любому участку обрабатываемой поверхности. В связи с этим **целью работы** является изучение влияния угла наклона колебательной системы на поверхностные свойства стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании. **В работе** исследованы образцы стали 45, обработанные ультразвуковым ППД с разными углами наклона колебательной системы: 90°, 75°, 60°, 45°. **Методами исследования** являлись металлографические исследования микроструктуры поверхностного слоя образцов, измерение их микротвердости и шероховатости, а также сравнительные испытания на износ. **Результаты и обсуждение.** Ультразвуковое поверхностное деформирование при любом из рассмотренных углов наклона инструмента α создает наклепанный слой – от 30 мкм при α = 45° до 350 мкм при α = 90°. При этом микротвердость повышается до 240 HV при α = 45°. При любом α также наблюдается значительное уменьшение шероховатости. Так, например, высотные параметры уменьшаются более чем в 8 раз. Лучшие результаты достигнуты при α = 60°. Результаты испытаний на износ показали, что износ по массе значительно уменьшается при ультразвуковой обработке. Наибольшее снижение износа (более чем в 2 раза) наблюдается при угле наклона α = 90°.

Для цитирования: Влияние угла наклона колебательной системы на поверхностные свойства стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании / Д.С. Фатюхин, Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько, С.К. Сундуков, А.В. Сухов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 77–92. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-77-92.

Введение

Требования к показателям надежности современной техники основаны на эксплуатационных свойствах деталей и сборочных единиц, таких как износостойкость, усталостная и коррозионная стойкость и др. Эти свойства в большей степени определяются комплексом физико-механических и геометрических свойств поверхностных слоев деталей. В настоящее время существует широкий спектр технологических методов формирования структуры, микротвердости, параметров шероховатости и субшероховатости. Наиболее востребованы методы, позволяющие обеспечить заданные характеристики поверхностей изделий без снятия слоя материала. К ним в первую очередь относятся методы поверхностного пластического деформирования (ППД) [1].

***Адрес для переписки**
Фатюхин Дмитрий Сергеевич, д.т.н., доцент
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Ленинградский проспект, 64,
125319, г. Москва, Россия
Тел.: +7 968 868-60-73, **e-mail:** mitriy2@yandex.ru

Как статические, так и динамические методы ППД могут быть значительно усовершенствованы наложением ультразвуковых колебаний на рабочий инструмент [2]. Такой технологический прием позволяет существенно повысить степень деформационного упрочнения и твердость, а также снизить шероховатость и получать регулярный микрорельеф.

Интенсификация процессов ППД с помощью ультразвука применяется широко. Этому виду обработки посвящено большое количество работ, как фундаментальных [4, 8, 9], так и прикладных [14, 15, 16].

Две основные схемы обработки ультразвуковым ППД основаны на применении деформирующих элементов, жестко связанных с колебательной системой или не имеющих жесткой связи с источником колебаний [23].

В 1964 году И.И. Мухановым впервые был предложен метод обработки ультразвуковым ППД жестко связанным с колебательной системой рабочим инструментом [21]. В развитие этого метода в 1975 году И.А. Стебельков запатентовал вид обработки свободными рабочими телами [22]. Жестко связанный рабочий инструмент позволяет производить более равномерную обработку и получить меньшую шероховатость поверхности, чем при обработке свободным деформирующим элементом [3, 6]. Однако при обработке свободным деформирующим элементом удается достичь большей степени деформационного упрочнения и глубины упрочненного слоя [25].

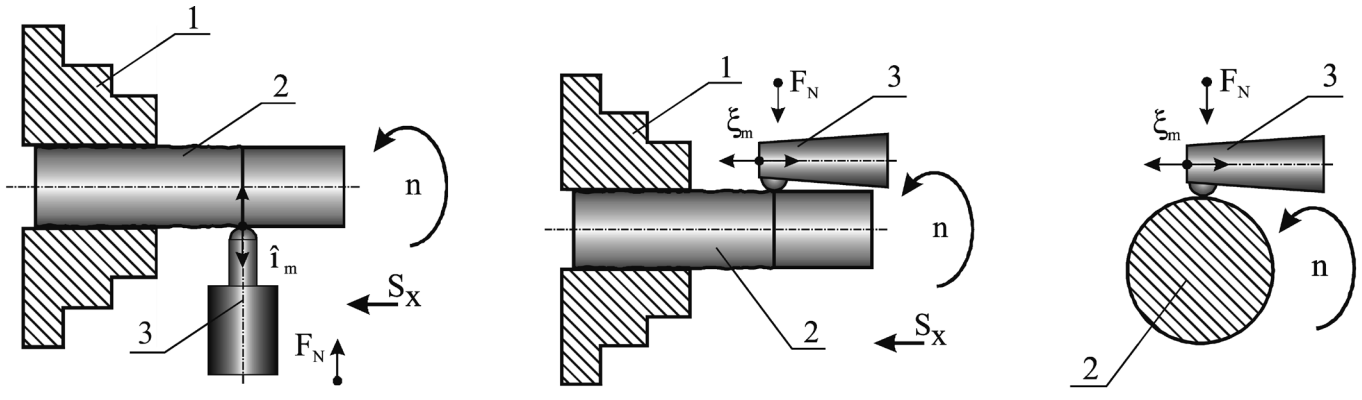
Одним из основных направлений работ по ультразвуковому ППД является изучение влияния этого метода обработки на структуру и свойства различных материалов на основе железа [5, 7], титана, алюминия и др. [11–13]. В последнее время это направление развивается в области нанотехнологий [20, 26].

Большинство технических решений по ультразвуковому ППД основано на передаче продольных колебаний рабочему инструменту. Используемое для получения наименьшей шероховатости ультразвуковое выглаживание может быть реализовано по трем схемам обработки, представленным на рис. 1.

Наибольшую сложность представляет обработка криволинейных поверхностей, в том числе полученных аддитивными технологиями [33–36].

При прямолинейном перемещении колебательной системы с инструментом вдоль криволинейной поверхности их силовое взаимодействие может значительно изменяться. Ось инструмента отклоняется от нормали к поверхности, и статическая сила прижима F раскладывается на составляющие (рис. 2).

При положении оси инструмента под углом $\alpha = 90°$ и статической силе прижима F существует только нормальная составляющая этой силы F_N, т. е. $F = F_N$. При $\alpha \neq 90°$ кроме нормальной



а *б* *в*

Рис. 1. Схемы обработки поверхностным пластическим деформированием:
а – с нормальными колебаниями; *б*, *в* – с тангенциальными колебаниями (*1* – патрон, *2* – обрабатываемая заготовка, *3* – инструмент)

Fig. 1. Surface plastic deformation (*SPD*) processing schemes:
а – with normal vibrations; *б*, *в* – with tangential vibrations (*1* – chuck, *2* – workpiece, *3* – tool)

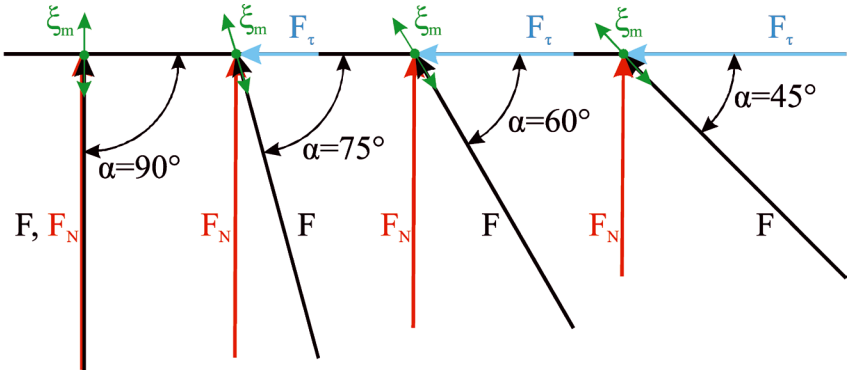


Рис. 2. Изменение нормальной F_N и тангенциальной F_τ составляющих силы взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при разных углах наклона инструмента α (ξ_m – амплитуда колебаний излучателя)

Fig. 2. Change in the normal F_N and tangential F_τ components of the interaction force between the tool and the workpiece surface at different tool inclination angles α (ξ_m – the amplitude of vibrations of the ultrasonic emitter)

составляющей F_N появляется и тангенциальная (касательная) составляющая F_τ. В этом случае $F_N = F\sin\alpha$, а $F_\tau = F\cos\alpha$. Таким же образом изменяется и периодическая сила, создаваемая инструментом.

Соответственно изменяется и характер воздействия на поверхность. При α = 90° и $F_N = F_{N\max}$ каждое колебание инструмента оставляет на поверхности сферический отпечаток, в центре которого нормальные деформации будут максимальны (рис. 3, *а*). При α ≠ 90° и наличии составляющей F_τ инструмент проскальзывает вдоль поверхности, и отпечатки вытягиваются, причем в начале отпечатка преобладают нормальные деформации, а в конце – сдвиговые (рис. 3, *б*). То есть по аналогии со статическими видами поверхностного пластического деформирования при α = 90° процесс осуществляется по схеме выглаживания, а при α ≠ 90° – по схеме вибрационного выглаживания.

Учитывая продольный характер колебаний, для обеспечения равномерной обработки криволинейных поверхностей ось инструмента должна быть направлена под заданным углом к любому участку обрабатываемой поверхности.

С целью повышения качества обработки поверхностей со сложной геометрией способы ультразвукового ППД совершенствуются и модернизируются [17, 19]. Появились способы обработки многоэлементными деформирующими инструментами [23, 24], а также гибридные способы, сочетающие в себе признаки выглаживающей и ударной обработки [27, 28] или комбинацию ППД с термической [31, 32] и химико-термической обработкой [29, 30].

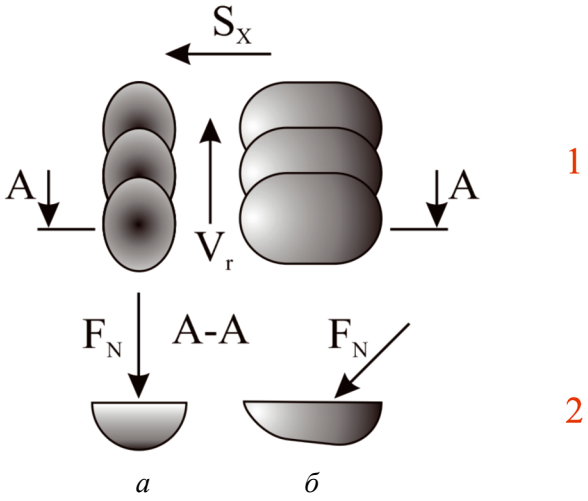


Рис. 3. Следы (*1*) и поперечные сечения следов (*2*) рабочего инструмента на поверхности образца:

а – при α = 90°; *б* – при α ≠ 90°

Fig. 3. Traces (*1*) and cross-sections of traces (*2*) of the working tool traces on the sample surface:

а – at α = 90°; *б* – at α ≠ 90°

В связи с этим ***целью работы*** является изучение влияния угла наклона колебательной системы на поверхностные свойства стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие ***задачи***:

– проанализировать изменение микроструктуры образцов, обработанных ультразвуковым ППД;

– оценить изменения микротвердости и шероховатости образцов;

– провести сравнительные испытания на износ образцов;

– предложить технологические рекомендации по эффективному применению обработки ультразвуковым ППД при различных углах наклона колебательной системы.

Методика исследований

Материалы и методика подготовки образцов

Для проведения экспериментальных исследований использовался горячекатаный пруток из конструкционной стали 45 диаметром 42 мм. Из прутка изготавливались цилиндрические образцы длиной 300 мм. Химический состав стали определялся спектральным анализом с помощью спектрометра Foundry-Master LAB (ООО «СИНЕРКОН», Москва, Россия). Состав приведен в таблице.

Образцы обрабатывались на токарном станке нормальной точности 16Е20 (Алма-Атинский станкостроительный завод, Алма-Ата, Казахстан). С образцов удалялся поверхностный слой толщиной 0,75 мм, после этого происходила обработка контурным резцом со следующими параметрами: подача резца S_X = 0,34 мм/об, частота вращения n = 560 об/мин, глубина резания t = 0,25 мм. При обработке контурным резцом с радиусом при вершине 0,4 мм был получен регулярный микрорельеф поверхности с шероховатостью поверхности Ra = 6,63 мкм, Rz = 30,1 мкм, R_{max} = 33,7 мкм, S_m = 0,260 мм, S = 0,055 мм, t_{30} = 11,6 % . Полученные значения соответствуют черновой обработке. Выбор параметров обработки образцов основан на анализе ранее проведенных исследований, например [37].

На образцах через каждые 50 мм делались проточки глубиной 3…4 мм, которые нужны для разделения поверхности образца на участки.

Однотипные образцы, изготовленные по приведенной методике, использовались для изучения влияния угла наклона колебательной системы на изменение свойств стали 45 под воздействием ультразвукового поверхностного пластического деформирования.

После обработки образцы нормализовались при T = 860 °С. Микротвердость на поверхности образцов составляла 165 HV 20, сердцевины материала – 125 HV 20.

Методика проведения эксперимента и оборудование

Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование проводилось по схеме, представленной на рис. 4. В резцедержателе токарного станка закреплялась ультразвуковая колебательная система с волноводом-концентратором. Использовалась стержневая трехполуволновая магнитострикционная колебательная система ПМС-2,0/22 (ООО «Афалина», Москва, Россия). Она состоит из магнитострикционного преобразователя, выполненного из сплава 49К2Ф и находящегося в кожухе водяного охлаждения, и припаянного к его торцу волновода-концентратора из титанового сплава.

Для обеспечения прижима индентора к обрабатываемой поверхности с необходимым усилием колебательная система снабжена пружиной, обеспечивающей заданное усилие прижима.

К волноводу колебательной системы посредством резьбового соединения присоединялся ступенчатый титановый излучатель с диаметром излучающей поверхности ∅16мм, который имеет коэффициент увеличения амплитуды колебаний k_y = 2. К рабочему торцу излучателя припаян индентор из твердого сплава ВК8. Индентор представляет собой пластину толщиной 6 мм в форме сегмента круга диаметром 16 мм. Край пластины закруглен.

Питание колебательной системы осуществлялось генератором УЗГ2-22 (ООО «Афалина», Москва, Россия), с максимальной выходной

Химический состав стали 45 [%]
Chemical composition of steel 45 (%)

Материал / Material	C	Cr	Mn	Ni	Cu	W	Si	Fe
45	0,46	0,09	0,55	0,27	0,1	0,01	0,21	98,31

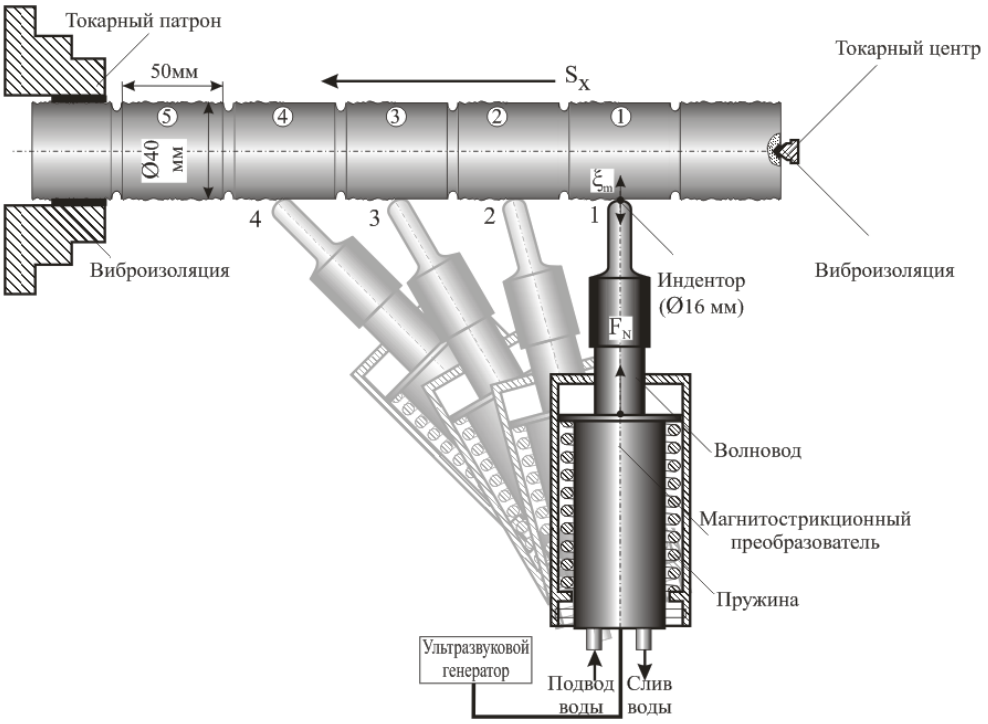


Рис. 4. Схема проведения эксперимента

Fig. 4. Design of an experiment

мощностью 2 кВт. Генератор имеет функции автоматической подстройки частоты (АПЧ) и амплитуды, которая позволяет изменять резонансную частоту при изменении механической нагрузки на торце излучателя.

Для измерений амплитуды колебательных смещений ξ_m использовался электродинамический виброметр, который представляет собой магнитную систему, состоящую из кольцевого постоянного магнита (ТУ 48-1301-16–73), измерительной катушки на каркасе из оргстекла, содержащей 800 витков провода ПЭВ2-0,1, и дисковых магнитопроводов. Виброметр располагали на волноводе стержневой колебательной системы.

Для оценки максимальной амплитуды колебаний ξ_m проводилась тарировка виброметра оптическим методом с помощью микроскопа. При работе колебательной системы сигнал с электродинамического виброметра подавался на вольтметр, шкала которого тарировалась с помощью микроскопа.

Образец с одной стороны закреплялся в патрон токарного станка, а с другой – поджимался токарным центром. Для предотвращения передачи высокочастотных колебаний на патрон и центр они снабжены фторопластовыми виброизоляционными прокладками.

Частота вращения шпинделя станка устанавливалась n = 560 об/мин, что для выбранного образца обеспечивает скорость обработки $V_r \approx 1{,}2$ м/с. Анализ литературы [25, 26] и данные предварительных экспериментов показывают, что изменение частоты вращения незначительно сказывается на изменении твердости и шероховатости. При варьировании скорости в широком диапазоне шероховатость при постоянных остальных параметрах изменялась не более чем на 8…12 %, а изменение твердости не превышало 10 %. Кроме того, при увеличении скорости значительно повышается и температура индентора.

На основании анализа исследований поверхностного пластического деформирования и данных предварительных экспериментов были выбраны параметры ультразвуковой обработки: продольная подача S_X, амплитуда колебаний ξ_{max} и усилие прижима F_N.

Для приведенного материала и условий обработки с уменьшением величины подачи S_X инструмента технологический эффект возрастает, но значительно снижается производительность обработки, поэтому было выбрано значение S_X = 0,24 мм/об. Амплитуда колебаний выбиралась в пределах ξ_m = 8…10 мкм, поскольку

при таких амплитудах наблюдается наиболее значительное снижение шероховатости поверхности. Увеличение усилия прижима свыше F_N = 100…120 Н не приводит к значимому результату, поэтому обработка проводилась при F_N = 100 Н.

Исследования влияния угла наклона колебательной системы на свойства деформированного слоя проводились следующим образом.

При обработке образца по схеме, приведенной на рис. 4, на участке *1* колебательная система с рабочим инструментом (индентором) устанавливалась в резцедержателе под углом α = 90° к поверхности образца. После обработки участка *1* поворотом резцедержателя изменялось положение колебательной системы. При обработке участка *2* угол наклона α колебательной системы составлял 75°, участка *3* – 60°, участка 4 – 45°. Участок *5* был оставлен в качестве контрольного образца.

Пример обработки участков образца при углах наклона колебательной системы 75° и 45° приведен на рис. 5.

Оценка микрогеометрии поверхности

У контрольных и обработанных образцов оценивались стандартные параметры шероховатости по ГОСТ 2789–73: среднее арифметическое отклонение профиля *Ra*, высота неровностей по 10 точкам *Rz*, максимальная высота неровностей профиля R_{max}, средний шаг неровностей профиля S_m, средний шаг местных выступов *S* и относительная опорная длина профиля t_p, где *p* – уровень сечения профиля. При измерениях уровень сечения профиля *p* принимался равным 30 %.

Измерение параметров шероховатости производилось на профилометре модели 130 (АО «Протон», Зеленоград, Россия).

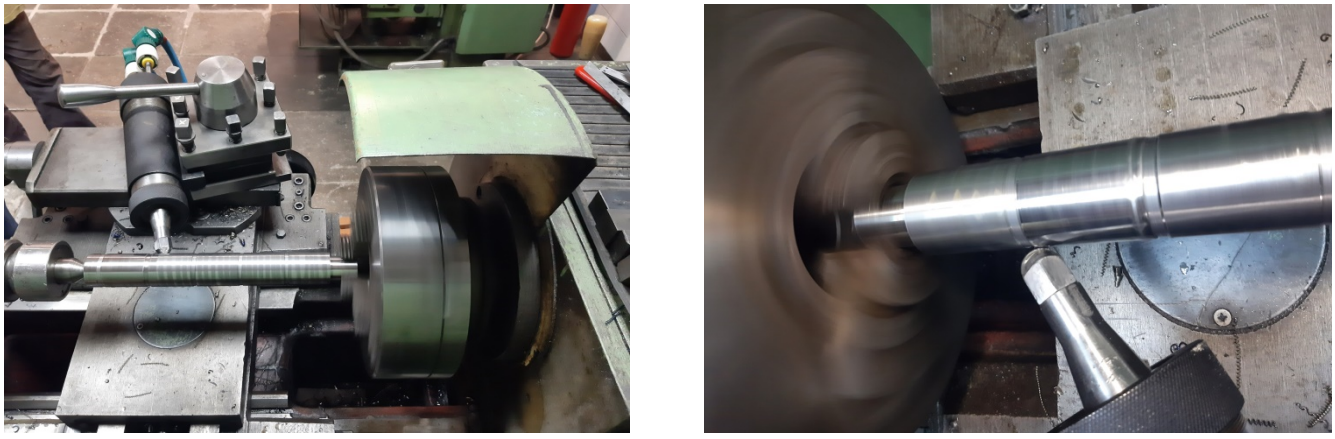
При построении зависимостей параметров шероховатости значения брались как среднее арифметическое из пяти измерений на разных участках образца. Полученные экспериментальные данные аппроксимировались методом наименьших квадратов. Числовая и графическая обработка результатов измерений выполнялась в программе Statistica. Поскольку разброс полученных значений не превышал интервал 3σ, то данные вполне могут считаться достоверными.

Оценка структуры и свойств поверхности

У контрольных и обработанных образцов также оценивались микроструктура и микротвердость.

Микроструктура изучалась на металлографическом микроскопе МЕТАМ РВ-22 (АО «ЛОМО», Санкт-Петербург, Россия), представляющем собой инвертированный микроскоп с верхним расположением столика. Микроскоп предназначен для визуального наблюдения микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов в отраженном свете при прямом освещении в светлом и темном поле. Диапазон увеличения 80–1000 крат.

Микротвердость образцов измерялась на микротвердомере ПМТ-3 (АО «ЛОМО», Санкт-



а *б*

Рис. 5. Обработка участков образца при углах наклона колебательной системы 75° (*а*) и 45° (*б*)

Fig. 5. Processing of sample sections at oscillating system inclination angles of 75° (*а*) and 45° (*б*)

Петербург, Россия) по методике, основанной на ГОСТ 2999–75. Глубина измененного слоя определялась в нормальном сечении.

Оценка трения и износа

Полученные образцы подвергались испытаниям на трение и изнашивание. Испытания проводились с помощью машины трения универсальной МТУ-01 (ООО «Продвинутые технологии», Москва) [38] по ТУ 32.99.53-001-78940767–2018.

Испытания проводились без использования смазочных материалов на образцах, представляющих собой сегмент цилиндра образца. В качестве контртела использовался стакан из стали 45 с наружным диаметром 34 мм и толщиной стенок 10 мм.

С помощью тензодатчиков МТУ-01 регистрировались момент трения и осевая нагрузка на шпинделе машины.

Схема контакта: торец вращающегося стакана и цилиндрическая поверхность образца. Графическое отображение изменений регистрируемых параметров записывается и обрабатывается компьютером с помощью программного модуля QMbox.

Износ при трении определялся по изменению веса испытуемых образцов до и после испытаний на аналитических весах GF-1000 (A&D Company, Limited, Japan) с дискретностью отсчета 0,001 г.

Результаты и их обсуждение

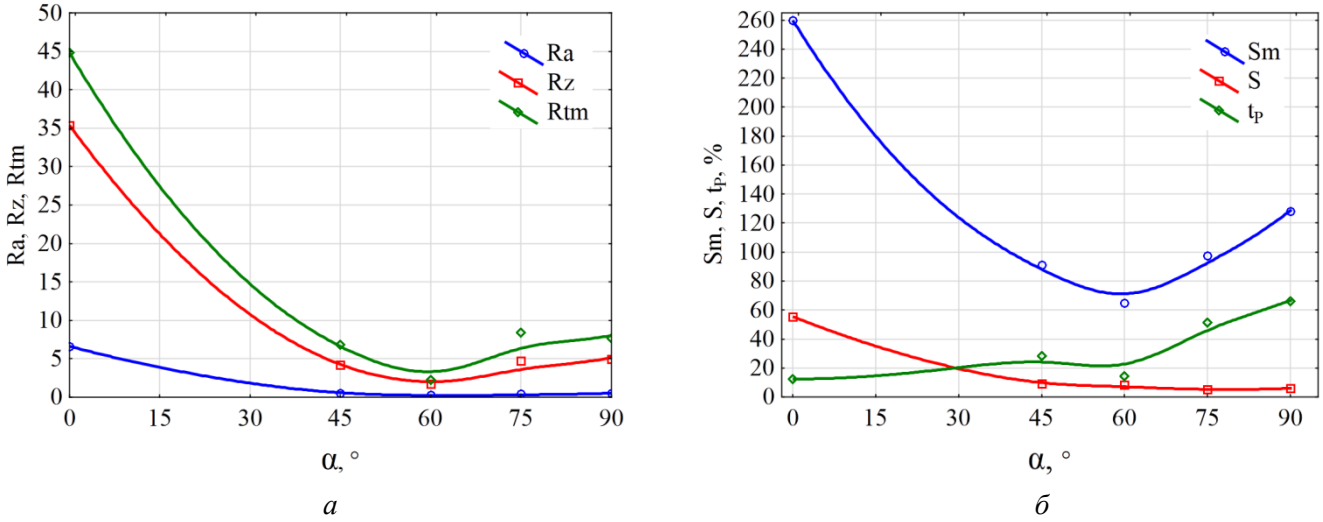
Шероховатость

При выбранном режиме ультразвукового поверхностного деформирования были получены результаты, представленные на рис. 6.

На представленных графиках значения шероховатости при α = 0° получены на образцах после токарной обработки с выбранными режимами без ультразвукового воздействия. Остальные зависимости получены при обработке образцов с углами наклона инструмента в рассматриваемом диапазоне 45°…90°. У всех образцов наблюдается значительное снижение высотных и шаговых параметров шероховатости, а также увеличение t_p. Наименьшие изменения наблюдаются при наклоне инструмента α = 90°, наибольшие – при α = 60°. Подобный характер изменений связан с тем, что при уменьшении α растет касательная составляющая статического усилия прижима F_τ и соответственно увеличиваются сдвиговые деформации.

На рис. 7 представлены профилограммы поверхности образцов до и после ультразвуковой обработки с разным углом наклона рабочего инструмента.

На профилограммах хорошо заметно формирование регулярного микрорельефа при обработке с углами наклона инструмента 90° и 75°. При меньших значениях углов регулярность нарушается, но происходит большее изменение параметров шероховатости.



а *б*

Рис. 6. Зависимость изменения параметров шероховатости от угла наклона инструмента α:
а – высотных *Ra*, *Rz*, R_{tm}; *б* – шаговых S_m, *S*, t_p

Fig. 6. Dependence of the change in the roughness parameters on the tool inclination angle α:
а – altitude *Ra*, *Rz*, R_{tm}; *б* – spacing S_m, *S*, t_p

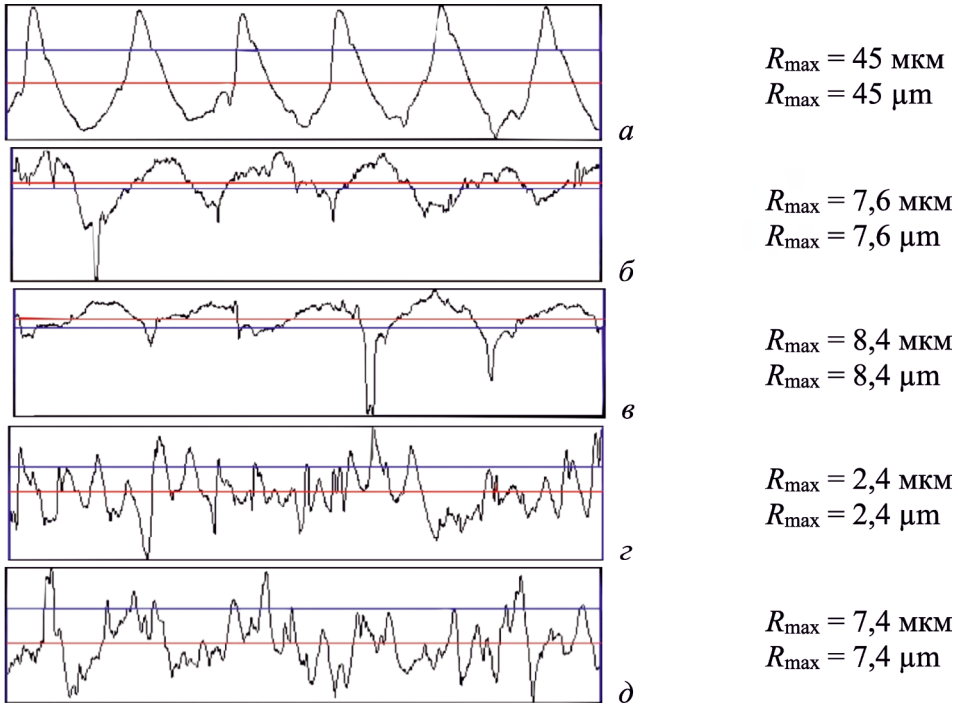


Рис. 7. Профилограммы поверхности, полученные при различных углах наклона рабочего инструмента:
а – без ППД; *б* – при α = 90°; *в* – при α = 75°; *г* – при α = 60°; *д* – при α = 45°

Fig. 7. Surface profiles obtained at different working tool inclination angles:
а – without *SPD*; *б* – at α = 90°; *в* – at α = 75°; *г* – at α = 60°; *д* – at α = 45°

Структура, твердость и микротвердость

При создании значительного усилия прижима деформирующий элемент и излучатель совершают синфазные колебания, т. е. инструмент не отрывается от обрабатываемой поверхности и условия обработки близки к выглаживанию. Основным механизмом, создающим деформации поверхностного слоя, является нагружение обрабатываемой поверхности шариком под действием статической силы прижима и значительно большей динамической силы, создаваемой колебаниями излучателя. При этом происходит как упрочнение, так и выглаживание поверхности.

Очевидно, что при наклоне инструмента α = 90° сила воздействия на поверхность имеет только одну нормальную оставляющую F_N, что создает наиболее благоприятные условия для упрочнения (наклёпа) поверхности. С уменьшением угла нормальная оставляющая F_N уменьшается, а касательная F_τ растет. Это приводит к снижению твердости и уменьшению глубины упрочненного слоя, но при этом уменьшается и размер микронеровностей за счет выглаживания.

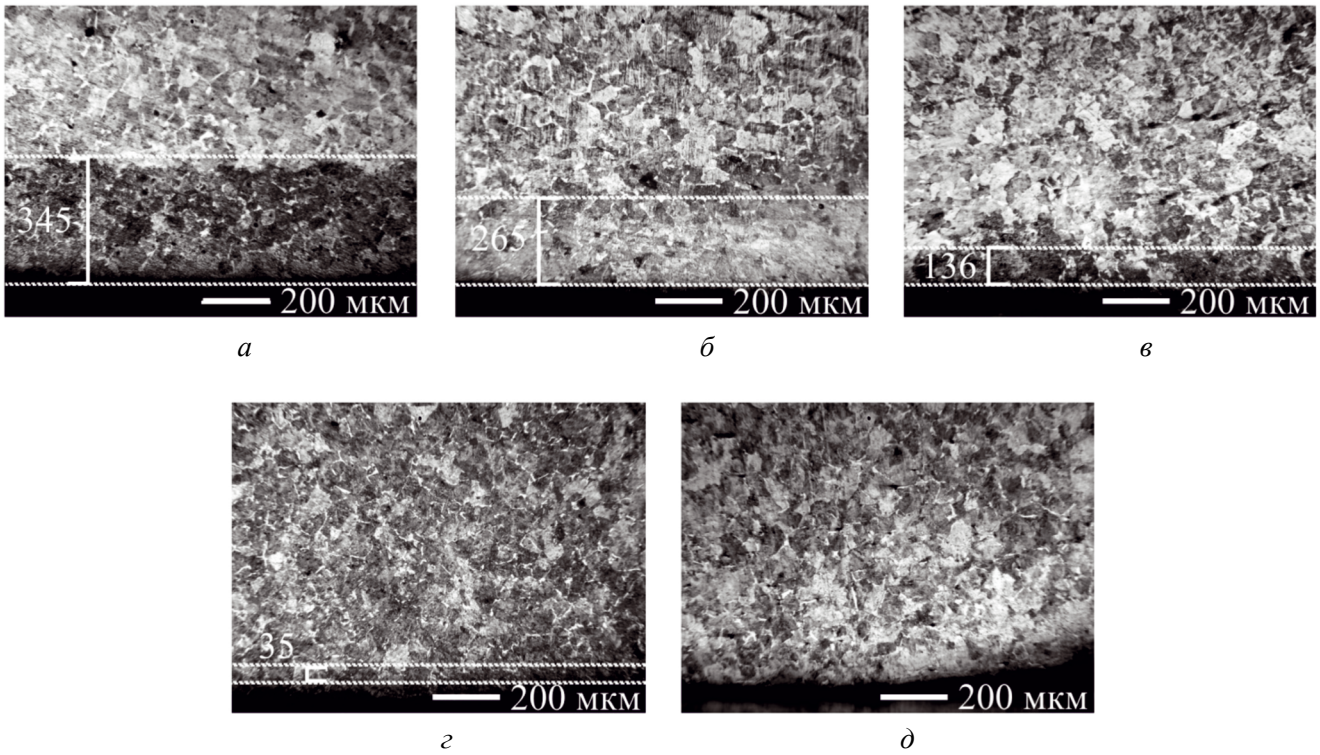
Результаты металлографических исследований представлены на рис. 8.

Как показывают результаты экспериментов (рис. 9), глубина наклепанного слоя увеличивается с увеличением угла наклона рабочего инструмента α. При α = 45° изменения структуры и свойств распространяются на глубину до 50 мкм, а при α = 90° глубина достигает 345 мм.

Очевидно, что глубина деформированного слоя определяется величиной нормальной оставляющей F_N силы. В то же время наибольшая микротвердость на глубине до 50 мкм достигается при α = 45°, что связано со сдвиговыми деформациями, создаваемыми касательной составляющей F_τ.

Момент трения и износ

Сравнительные испытания износа образцов проводились при постоянном усилии прижима между образцом и контртелом N = 25 Н. Частота вращения шпинделя n = 160 об/мин. В результате была получена зависимость (рис. 10) изменения момента трения $M_{тр}$ на протяжении 1000 циклов.



а *б* *в*

г *д*

Рис. 8. Структуры образцов, полученные при различных углах наклона рабочего инструмента:
а – при α = 90°; *б* – при α = 75°; *в* – при α = 60°; *г* – при α = 45°; *д* – без ППД

Fig. 8. Microstructures of samples obtained at different working tool inclination angles:
а – at α = 90°; *б* – at α = 75°; *в* – at α = 60°; *г* – at α = 45; *д* – without *SPD*

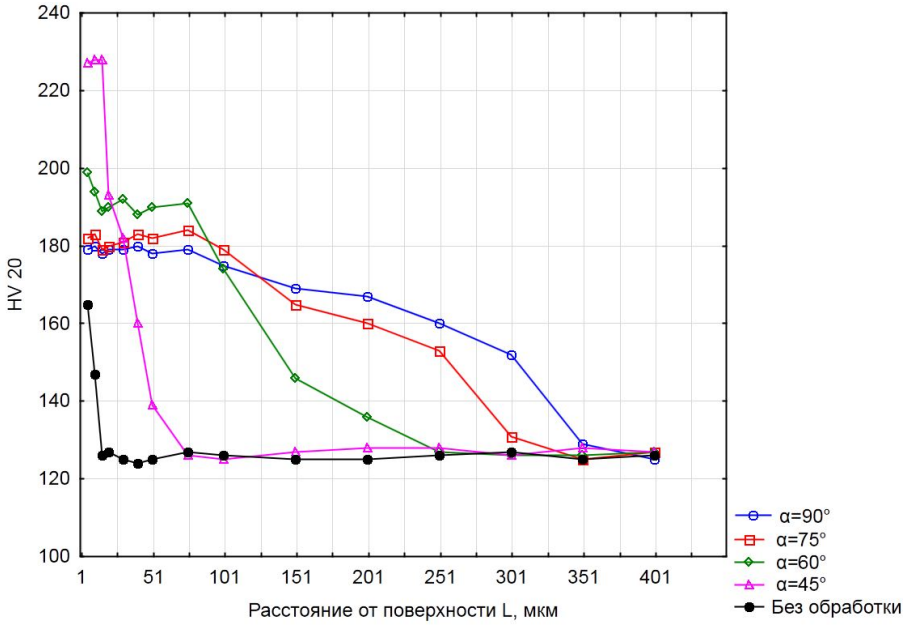


Рис. 9. Глубина наклепанного слоя *L* при различных углах наклона рабочего инструмента α

Fig. 9. Hardened layer depth *L* at different working tool inclination angles α

Как повышение твердости, так и снижение шероховатости оказывают определенное влияние на процессы трения и изнашивания. Результаты проведенных исследований показывают, что момент трения $M_{тр}$ для всех испытуемых образцов на протяжении 450…550 циклов растет.

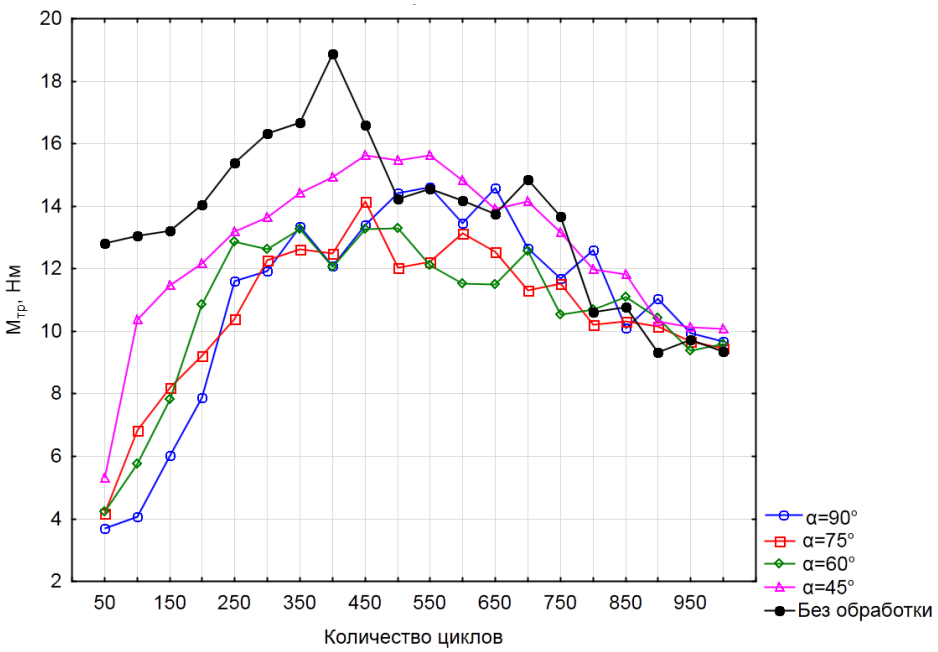


Рис. 10. Динамика изнашивания образцов, полученных при различных углах наклона рабочего инструмента α

Fig. 10. Wear dynamics of samples obtained at different working tool inclination angles α

Наибольшие моменты трения наблюдаются при изнашивании поверхностного слоя, что соответствуют периоду приработки для определенных условий трения. При формировании на образцах равновесной шероховатости момент трения $M_{тр}$ начинает снижаться.

Наибольший момент трения $M_{тр}$ наблюдался у образца без обработки ППД. У образцов, обработанных ППД с различными углами наклона рабочего инструмента α, регистрировался значительно меньший $M_{тр}$, что указывает на снижение износа. После достижения глубины износа образцов, соответствующей глубине деформированного слоя, процесс стабилизируется и при продолжительности 850…1000 циклов динамика изменения момента трения $M_{тр}$ становится схожей для всех образцов.

До и после испытаний на трение образцы взвешивались. С уменьшением угла наклона колебательной системы величина износа по массе увеличивалась. Наименьший износ (0,146 г) зафиксирован у образцов, обработанных при угле наклона α = 90°. При углах α, равных 75°, 60° и 45°, изменение массы составило соответственно 0,195, 0,178 и 0,231 г.

Выводы

Проведенные исследования по влиянию ультразвукового поверхностного пластического деформирования с различными углами наклона рабочего инструмента на свойства поверхности образцов из стали 45 позволили выявить особенности этого технологического приема.

Исследования показали, что на контролируемые в исследовании характеристики поверхностного слоя угол наклона рабочего инструмента оказывает различное влияние.

Ультразвуковое ППД на выбранных режимах обработки позволяет снизить высотные параметры шероховатости до 6–7 раз, шаговые – до 3 раз, а также повысить относительную опорную длину профиля до 4 раз. Причем лучшие результаты достигнуты при угле наклона α = 45°.

Наибольшая глубина наклепанного слоя достигается при α = 90° и при выбранных режимах обработки составляет 345 мкм. С уменьшением угла α нормальная составляющая силы взаимодействия инструмента с заготовкой уменьшается, соответственно уменьшается и наклёп. Наименьший износ наблюдается также при большей глубине наклёпа.

На основании проведенных исследований можно констатировать, что выбор угла наклона колебательной системы осуществляется на основании требований к получаемому поверхностному слою. В случаях, когда требуется получить наименьшие значения параметров шероховатости, целесообразна установка угла наклона α = 45°…60°. Наибольшая глубина деформированного слоя и, как следствие, большая износостойкость достигается при α = 75°…90°.

Поскольку, как отмечалось, наиболее значимыми факторами являются подача и усилие прижима, то полученные результаты могут быть использованы при обработке криволинейных поверхностей деталей, в частности, полученных аддитивными технологиями. В таких случаях ультразвуковое оборудование устанавливается на станок, обеспечивающий требуемую стратегию перемещения рабочего инструмента, при этом наиболее рациональным технологическим приемом является регулирование угла наклона колебательной системы в процессе обработки.

Список литературы

1. *Radchenko V.P., Saushkin M.N., Bochkova T.I.* A mathematical modeling and experimental study of forming and relaxation of the residual stresses in plane samples made of EP742 alloy after the ultrasonic hardening under the high-temperature creep conditions // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2016. – Vol. 1. – P. 93–112. – DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.07.

2. *Крылова Н.А., Шуваев В.Г.* Обеспечение надежности и качества поверхностей деталей ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием // Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 205–206. – EDN YAFGEH.

3. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / под ред. О.В. Абрамова и В.М. Приходько. – М.: Янус-К, 2006. – 687 с. – ISBN 5-8037-0314-1. – EDN QNBJAF.

4. Impact of time on ultrasonic cavitation peening via detection of surface plastic deformation / F. Bai, K.-A. Saalbach, L. Wang, X. Wang, J. Twiefel // Ultrasonics. – 2018. – Vol. 84. – P. 350–355. – DOI: 10.1016/j.ultras.2017.12.001.

5. Effects of ultrasonic surface rolling on fretting wear behaviors of a novel 25CrNi2MoV steel / Y. Zhang, L. Huang, F. Lu, S. Qu, V. Ji, X. Hu, H. Liu // Materials Letters. – 2021. – Vol. 284 (2) – P. 128955. – DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128955.

6. Microstructure and mechanical properties of additively manufactured CrMnFeCoNi high-entropy alloys after ultrasonic surface rolling process / Z. Cui, Y. Mi, D. Qiu, P. Dong, Z. Qin, D. Gong, W. Li // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 887. – P. 161393. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161393.

7. The influence of ultrasonic surface rolling on the fatigue and wear properties of 23-8N engine valve steel / F. Lai, S. Qu, R. Lewis, T. Slatter, W. Fu, X. Li // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 125. – P. 299–313. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.04.010.

8. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 3 / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 689 с.

9. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов / под ред. А.И. Манохина. – М.: Наука, 1986. – 277 с.

10. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с. – ISBN 978-5-907104-23-5. – EDN WNWHDF.

11. Effects of the different frequencies and loads of ultrasonic surface rolling on surface mechanical properties and fretting wear resistance of HIP Ti–6Al–4V alloy / G. Li, S.G. Qu, Y.X. Pan, X.Q. Li // Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 389. – P. 324–334. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.07.120.

12. Effect of ultrasonic surface rolling at low temperatures on surface layer microstructure and properties of HIP Ti-6Al-4V alloy / G. Li, S. Qu, M.X. Xie, X. Li // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 316. – P. 75–84. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.099.

13. Effect of multi-pass ultrasonic surface rolling on the mechanical and fatigue properties of HIP Ti-6Al-4V alloy / G. Li, S. Qu, M. Xie, Z. Ren, X. Li // Materials. – 2017. – Vol. 10. – P. 133. DOI: 10.3390/ma10020133.

14. Experimental study on surface integrity of ultra-high-strength steel by ultrasonic hot rolling surface strengthening / X. Luan, W. Zhao, Z. Liang, S. Xiao, G. Liang, Y. Chen, S. Zou, X. Wang // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 392. – P. 125745. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125745.

15. The effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on low temperature nitriding of ultra-high strength steel / W. Zhao, D. Liu, H. Qin, X. Zhang, H. Zhang, R. Zhang, Z. Ren, C. Ma, A. Amanov, Y.-S. Pyun, G.L. Doll, Y. Dong, C. Ye // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 375. – P. 205–214. – DOI: 0.1016/j.surfcoat.2019.07.006.

16. Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing / W. Ting, W. Dongpo, L. Gang, G. Baoming, S. Ningxia // Applied Surface Science. – 2008. – Vol. 255 (5). – P. 1824–1829. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.06.034.

17. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications / M. John, A.M. Ralls, S.C. Dooley, A.K.V. Thazhathidathil, A.K. Perka,

U.B. Kuruveri, P.L. Menezes // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11 (22). – P. 10986. – DOI: 10.3390/app112210986.

18. Применение ультразвука при сборочно-разборочных операциях / В.Ф. Казанцев, Б.А. Кудряшов, А.Н. Неверов, Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько. – М.: Техполиграфцентр, 2008. – 145 с. – ISBN 978-5-94385-040-0. – EDN QNCHIX.

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

20. *Cao X.J., Pyoun Y.S., Murakami R.* Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification // Applied Surface Science. – 2010. – Vol. 256 (21). – P. 6297–6303. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.04.007.

21. *Муханов И.И., Голубев Ю.М.* Упрочнение стальных деталей шариком, вибрирующим с ультразвуковой частотой // Вестник машиностроения. – 1966. – № 11. – С. 52–53.

22. Авторское свидетельство № 456704 А1 СССР, МПК В23Р 1/18. Способ поверхностного упрочнения: № 1718835: заявл. 29.11.1971: опубл. 15.01.1975 / И.А. Стебельков; заявитель Предприятие П/Я Г-4561. – EDN DXTPEB.

23. Способы ультразвукового поверхностного пластического деформирования / Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько, С.К. Сундуков, А.В. Сухов, Д.С. Фатюхин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 7 (133). – С. 33–39. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39. – EDN EGTURS.

24. Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool / R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodriguez, G. Gomez-Gras, J. Lluma-Fuentes // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Vol. 257. – P. 203–212. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.036.

25. Influence of surface ultrasonic rolling on microstructure and corrosion property of T4003 ferritic stainless steel welded joint / P. Liu, R. Yu, X. Gao, G. Zhang // Metals. – 2020. – Vol. 10. – P. 1081. – DOI: 10.3390/met10081081.

26. Enhanced wear resistance of 316 L stainless steel with a nanostructured surface layer prepared by ultrasonic surface rolling / C. Wang, J. Han, J. Zhao, Y. Song, J. Man, H. Zhu, J. Sun, L. Fang // Coatings. – 2019. – Vol. 9. – P. 276. – DOI: 10.3390/coatings9040276.

27. Optimizing the parameters of ultrasonic surface plastic deformation by a free steel indenter / R.I. Nigmetzyanov, V.M. Prikhodko, S.K. Sundukov, A.V. Sukhov, D.S. Fatyukhin // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42 (11). – P. 1195–1198. – DOI: 10.3103/S1068798X22110181.

28. Выбор и оптимизация режимов ультразвукового поверхностного деформирования / В.Ф. Казанцев, Ю.М. Лужнов, Р.И. Нигметзянов, С.К. Сундуков, Д.С. Фатюхин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 4 (47). – С. 26–32. – EDN XDBUGV.

29. Упрочнение поверхностного слоя деталей машин методами химико-термической обработки и ультразвуковыми технологиями / Л.Н. Бритвин, В.А. Германова, В.И. Карагодин, Р.И. Нигметзянов, Д.С. Фатюхин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – № 1 (48). – С. 63–67. – EDN YGTWIP.

30. Sequential treatment of steel surfaces by nitriding and ultrasonic hardening / S.K. Sundukov, R.I. Nigmetzyanov, V.M. Prikhodko, D.S. Fatyukhin // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910. – P. 484–489. – DOI: 10.4028/p-vz1gn6. – EDN IZHMOF.

31. Hybrid technology for surface hardening of structural steel / O.V. Chudina, V.M. Prikhod'ko, D.S. Simonov, P. Bringulis // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42 (11). – P. 1192–1194. – DOI: 10.3103/s1068798x22110065. – EDN PWBBGV.

32. Effective combined surface hardening processes of structural steels using ultrasound / O. Chudina, D. Simonov, T. Simonova, A. Litovchenko // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 431. – P. 06024. – DOI: 10.1051/e3sconf/202343106024.

33. *Salmi M., Huuki J., Ituarte I.F.* The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface made by additive manufacturing // Progress in Additive Manufacturing. – 2017. – Vol. 2. – P. 31–41. – DOI: 10.1007/s40964-017-0017-z.

34. Enhancement of the microstructure and fatigue crack growth performance of additive manufactured titanium alloy parts by laser-assisted ultrasonic vibration processing / S.A. Ojo, K. Manigandan, G.N. Morscher, A.L. Gyekenyesi // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2024. – Vol. 33. – P. 10345–10359. – DOI: 10.1007/s11665-024-09323-8.

35. 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. – P. 1–10. – DOI: 10.1007/s11665-024-09173-4.

36. 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

37. Comprehensive estimation of changes in the microgeometry of steel 45 by ultrasonic plastic deformation with a free deforming element / D.S. Fatyukhin, R.I. Nigmetzyanov, V.M. Prikhodko, A.V. Sukhov, S.K. Sundukov // Metals. – 2023. – Vol. 13 (1). – P. 114. – DOI: 10.3390/met13010114. – EDN VTASEF.

38. Машина трения универсальная МТУ-01. ТУ 32.99.53-001-78940767-2018. Руководство по эксплуатации. – ООО «Продвинутые технологии», 2023. – 18 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

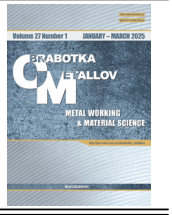
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 1 pp. 77–92
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-77-92

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Influence of the oscillating systems inclination angle on the surface properties of steel 45 during ultrasonic surface plastic deformation

Dmitry Fatyukhin [a], ***Ravil Nigmetzyanov*** [b], ***Vyacheslav Prikhodko*** [c], ***Sergey Sundukov*** [d], ***Aleksandr Sukhov*** [e]

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

[a] https://orcid.org/0000-0002-5914-3415, mitriy2@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0009-0008-1443-7584, lefmo@yandex.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-8261-0424, prikhodko@madi.ru; [d] https://orcid.org/0000-0003-4393-4471, sergey-lefmo@yandex.ru;
[e] https://orcid.org/0009-0009-9097-8216, sukhov-aleksandr96@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 22 November 2024
Revised: 03 December 2024
Accepted: 03 February 2025
Available online: 15 March 2025

Keywords:
Ultrasound
Surface layer
Ultrasonic vibrations
Surface deformation
Roughness
Microhardness

Funding
This research was funded by the project of the Russian Science Foundation No. 24-19-00463, https://rscf.ru/project/24-19-00463/.

ABSTRACT

Introduction. Among the methods of modifying the surfaces of metal products to change the physical-mechanical and geometric properties of the surface layer, surface plastic deformation (*SPD*) methods are the most prevalent. Using ultrasound to enhance the efficiency of deformation processes allows for increase in microhardness and reduction in roughness compared to rolling and smoothing. The greatest technological challenges are caused by ultrasonic surface plastic deformation of curved surfaces, including those obtained by additive technologies. Given that most ultrasonic *SPD* methods are based on the longitudinal nature of vibrations, to ensure uniform processing of curved surfaces, the tool axis should be oriented at a specific angle relative to any point on the surface being processed. In this regard, **the purpose of the work** is to study the effect of the oscillating system inclination angle on the surface properties of steel 45 during ultrasonic surface plastic deformation. This study examines steel 45 samples subjected to ultrasonic *SPD* at various oscillating system inclination angles: 90°, 75°, 60°, and 45°. **Methods.** The research methods included metallographic studies of the surface layer microstructure of the samples, measurement of its microhardness and roughness, as well as comparative wear tests. **Results and discussion.** Ultrasonic surface deformation, at any of the considered tool inclination angles **α**, creates a hardened layer – from 30 μm at **α** = 45° to 350 μm at **α** = 90 °. In this case, the microhardness increases to 240 HV at **α** = 45°. Furthermore, at any **α**, there is a significant decrease in roughness. For example, altitude parameters are reduced by more than 8 times. The best results were achieved at **α** = 60°. The wear test results indicated a substantial reduction in weight loss due to wear following ultrasonic processing. The most significant decrease in wear (more than twofold) was observed at an inclination angle of **α** = 90°.

For citation: Fatyukhin D.S., Nigmetzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Sukhov A.V. Influence of the oscillating systems inclination angle on the surface properties of steel 45 during ultrasonic surface plastic deformation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 77–92. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-77-92. (In Russian).

References

1. Radchenko V.P., Saushkin M.N., Bochkova T.I. A mathematical modeling and experimental study of forming and relaxation of the residual stresses in plane samples made of EP742 alloy after the ultrasonic hardening under the high-temperature creep conditions. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, vol. 1, pp. 93–112. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.07.

2. Krylova N.A., Shuvaev V.G. Obespechenie nadezhnosti i kachestva poverkhnostei detalei ul'trazvukovym poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Ensuring the reliability and quality of surfaces of parts by ultrasonic surface plastic deformation]. *Nadezhnost' i kachestvo = Reliability and Quality*, 2018, vol. 2, pp. 205–206.

*** Corresponding author**
Fatyukhin Dmitriy S., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
Moscow Automobile and Road Construction
State Technical University (MADI),
64 Leningradsky prospect,
125319, Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 968 868-60-73, **e-mail:** mitriy2@yandex.ru

3. Abramov O.V., Prikhod'ko V.M., ed. *Moshchnyi ul'trazvuk v metallurgii i mashinostroenii* [Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering], Moscow, Yanus-K Publ., 2006. 687 p. ISBN 5-8037-0314-1.

4. Bai F., Saalbach K.-A., Wang L., Wang X., Twiefel J. Impact of time on ultrasonic cavitation peening via detection of surface plastic deformation, *Ultrasonics*, 2018, vol. 84, pp. 350–355. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.12.001.

5. Zhang Y., Huang L., Lu F., Qu S., Ji V., Hu X., Liu H. Effects of ultrasonic surface rolling on fretting wear behaviors of a novel 25CrNi2MoV steel. *Materials Letters*, 2021, vol. 284 (2), p. 128955. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128955.

6. Cui Z., Mi Y., Qiu D., Dong P., Qin Z., Gong D., Li W. Microstructure and mechanical properties of additively manufactured CrMnFeCoNi high-entropy alloys after ultrasonic surface rolling process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 887, pp. 161393. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161393.

7. Lai F., Qu S., Lewis R., Slatter T., Fu W., Li X. The influence of ultrasonic surface rolling on the fatigue and wear properties of 23-8N engine valve steel. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 125, pp. 299–313. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.04.010.

8. Rosenberg L.D., ed. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka*. Kn. 3 [Physics and technology of powerful ultrasound. Vol. 3]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 689 p.

9. Manokhin A.I., ed. *Vozdeistvie moshchnogo ul'trazvuka na mezhfaznuyu poverkhnost' metallov* [The effect of powerful ultrasound on the interphase surface of metals]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 277 p.

10. Suslov A.G., ed. *Spravochnik tekhnologa* [Technologist's handbook]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 800 p. ISBN 978-5-907104-23-5.

11. Li G., Qu S.G., Pan Y.X., Li X.Q. Effects of the different frequencies and loads of ultrasonic surface rolling on surface mechanical properties and fretting wear resistance of HIP Ti–6Al–4V alloy. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 389, pp. 324–334. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.07.120.

12. Li G., Qu S., Xie M.M., Li X. Effect of ultrasonic surface rolling at low temperatures on surface layer microstructure and properties of HIP Ti-6Al-4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 316, pp. 75–84. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.099.

13. Li G., Qu S., Xie M., Ren Z., Li X. Effect of multi-pass ultrasonic surface rolling on the mechanical and fatigue properties of HIP Ti-6Al-4V alloy. *Materials*, 2017, vol. 10, p. 133. DOI: 10.3390/ma10020133.

14. Luan X., Zhao W., Liang Z., Xiao S., Liang G., Chen Y., Zou S., Wang X. Experimental study on surface integrity of ultra-high-strength steel by ultrasonic hot rolling surface strengthening. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 392, p. 125745. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125745.

15. Zhao W., Liu D., Qin H., Zhang X., Zhang H., Zhang R., Ren Z., Ma C., Amanov A., Pyun Y.-S., Doll G.L., Dong Y., Ye C. The effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on low temperature nitriding of ultra-high strength steel. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 375, pp. 205–214. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.006.

16. Ting W., Dongpo W., Gang L., Baoming G., Ningxia S. Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing. *Applied Surface Science*, 2008, vol. 255 (5), pp. 1824–1829. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.06.034.

17. John M., Ralls A.M., Dooley S.C., Thazhathidathil A.K.V., Perka A.K., Kuruveri U.B., Menezes P.L. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11 (22), p. 10986. DOI: 10.3390/app112210986.

18. Kazantsev V.F., Kudryashov B.A., Neverov A.N., Nigmetzyanov R.I., Prikhod'ko V.M. *Primenenie ul'trazvuka pri sborochno-razborochnykh operatsiyakh* [The use of ultrasound in assembly and disassembly operations]. Moscow, Tekhpoligraftsentr Publ., 2008. 145 p. ISBN 978-5-94385-040-0.

19. Prikhod'ko V.M. *Ul'trazvukovye tekhnologii pri proizvodstve i remonte avtotraktornoi tekhniki* [Ultrasonic technologies in the production and repair of automotive equipment]. Moscow, Tekhpoligraftsentr Publ., 2000. 252 p. ISBN 5-900095-16-9.

20. Cao X.J., Pyoun Y.S., Murakami R. Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification. *Applied Surface Science*, 2010, vol. 256 (21), pp. 6297–6303. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.04.007.

21. Mukhanov I.I., Golubev Yu.M. Uprochnenie stal'nykh detalei sharikom, vibriruyushchim s ul'trazvukovoi chastotoi [Hardening of steel parts with a ball vibrating at ultrasonic frequency]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 1966, vol. 11, pp. 52–53. (In Russian).

22. Stebel'kov I.A. *Sposob poverkhnostnogo uprochneniya* [Surface hardening method]. Inventor's Certificate USSR, no. 456704, 1975.

23. Nigmetzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Sposoby ul'trazvukovogo poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Methods of ultrasonic surface plastic deformation]. *Naukoemkie*

tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2022, vol. 7 (133), pp. 33–39. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39.

24. Jerez-Mesa R., Travieso-Rodriguez J.A., Gómez-Gras G., Llumà-Fuentes J. Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 257, pp. 203–212. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.036.

25. Liu P., Yu R., Gao X., Zhang G. Influence of surface ultrasonic rolling on microstructure and corrosion property of T4003 ferritic stainless steel welded joint. *Metals*, 2020, vol. 10, p. 1081. DOI: 10.3390/met10081081.

26. Wang C., Han J., Zhao J., Song Y., Man J., Zhu H., Sun J., Fang L. Enhanced wear resistance of 316 L stainless steel with a nanostructured surface layer prepared by ultrasonic surface rolling. *Coatings*, 2019, vol. 9, p. 276. DOI: 10.3390/coatings9040276.

27. Nigmetzyanov R.I., Prikhod'ko V.M., Sundukov S.K., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Optimizing the parameters of ultrasonic surface plastic deformation by a free steel indenter. *Russian Engineering Research*, 2022, vol. 42 (11), pp. 1195–1198. DOI: 10.3103/s1068798x22110181.

28. Kazantsev V.F., Luzhnov Yu.M., Nigmetzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Vybor i optimizatsiya rezhimov ul'trazvukovogo poverkhnostnogo deformirovaniya [Selection and optimization of ultrasonic surface deformation modes]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) = Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*, 2016, vol. 4 (47), pp. 26–32.

29. Britvin L.N., Germanova V.A., Karagodin V.I., Nigmetzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Uprochnenie poverkhnostnogo sloya detalei mashin metodami khimiko-termicheskoi obrabotki i ul'trazvukovymi tekhnologiyami [Hardening of the surface layer of machine parts using chemical-thermal treatment methods and ultrasonic technologies]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) = Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*, 2017, vol. 1 (48), pp. 63–67.

30. Sundukov S.K., Nigmetzyanov R.I., Prikhodko V.M., Fatyukhin D.S. Sequential treatment of steel surfaces by nitriding and ultrasonic hardening. *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 910, pp. 484–489. DOI: 10.4028/p-vz1gn6.

31. Chudina O.V., Prikhod'ko V.M., Simonov D.S., Bringulis P. Hybrid technology for surface hardening of structural steel. *Russian Engineering Research*, 2022, Vol. 42 (11), pp. 1192–1194. DOI: 10.3103/s1068798x22110065.

32. Chudina O., Simonov D., Simonova T., Litovchenko A. Effective combined surface hardening processes of structural steels using ultrasound. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 431, p. 06024. DOI: 10.1051/e3sconf/202343106024.

33. Salmi M., Huuki J., Ituarte I.F. The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface made by additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2017, vol. 2, pp. 31–41. DOI: 10.1007/s40964-017-0017-z.

34. Ojo S.A., Manigandan K., Morscher G.N., Gyekenyesi A.L. Enhancement of the microstructure and fatigue crack growth performance of additive manufactured titanium alloy parts by laser-assisted ultrasonic vibration processing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, vol. 33, pp. 10345–10359. DOI: 10.1007/s11665-024-09323-8.

35. 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, pp. 1–10. DOI: 10.1007/s11665-024-09173-4.

36. 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.

37. Fatyukhin D.S., Nigmetzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sukhov A.V., Sundukov S.K. Comprehensive estimation of changes in the microgeometry of steel 45 by ultrasonic plastic deformation with a free deforming element. *Metals*, 2023, vol. 13 (1), p. 114. DOI: 10.3390/met13010114.

38. *Universal friction machine MTU-01. TU 32.99.53-001-78940767-2018*. Operation manual. LLC Advanced Technologies Publ., 2023. 18 p. (In Russian).

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).