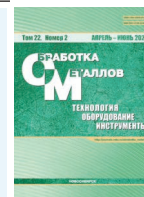




# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



## Особенности формирования топографии поверхности конструкционной стали 09Г2С при ультразвуковой ударно-фрикционной упрочняющей обработке

Никита Лежнин<sup>1, a, \*</sup>, Алексей Макаров<sup>1, b</sup>, Сергей Лучко<sup>1, c</sup>, Борис Логинов<sup>2, d</sup>,  
 Артем Логинов<sup>3, e</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», пл. Шокина, 1, г. Зеленоград, г. Москва, 124498, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9483-6607>, [nlezhnin@bk.ru](mailto:nlezhnin@bk.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>, [avm@imp.uran.ru](mailto:avm@imp.uran.ru),

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2368-0913>, [serojaluchko@gmail.com](mailto:serojaluchko@gmail.com), <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5081-1424>, [b-loginov@mail.ru](mailto:b-loginov@mail.ru),

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2090-5301>, [loginov.ab15@physics.msu.ru](mailto:loginov.ab15@physics.msu.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.15-194.52:539.378

#### История статьи:

Поступила: 20 марта 2020

Рецензирование: 20 апреля 2020

Принята к печати: 11 мая 2020

Доступно онлайн: 15 июня 2020

#### Ключевые слова:

Поверхностное деформационное упрочнение

Ультразвуковая ударная обработка

Шероховатость поверхности

Конструкционная сталь

#### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России по теме № АААА-А18-118020190116-6 при поддержке РФФИ (проект № 18-38-00868 мол\_а).

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ультразвуковая ударно-фрикционная обработка (УЗУФО) – новый метод поверхностного деформационного упрочнения, позволяющий изменять свойства и микроструктуру поверхностного слоя металла. В отличие от традиционной ультразвуковой ударной обработки (УЗУО) особенностью УЗУФО является приложении ударного воздействия с ультразвуковой частотой под острым углом  $\alpha$  к обрабатываемой поверхности для активизации ротационного механизма деформации за счет дополнительного фрикционного нагружения. Для усиления фрикционного воздействия и предотвращения охрупчивания диффузионно-активного деформированного слоя УЗУФО проводится в безокислительной атмосфере аргона. Уменьшение угла  $\alpha$  при УЗУФО приводит к смещению пластического валика, вытесненного инструментом металла в направлении удара. Следовательно, положение инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой, относительно траектории его перемещения может оказывать сильное влияние на получаемый микрорельеф поверхности. **Цель работы** – изучить влияние направления ударного воздействия относительно поперечной подачи инструмента в процессе УЗУФО под углом  $\alpha = 50^\circ$  в среде аргона на шероховатость и степень упрочнения поверхности конструкционной стали 09Г2С. **Методы исследования.** Проведены измерения микротвердости, атомно-силовая микроскопия, оптическая профилометрия, оптическая и сканирующая электронная микроскопия с использованием EBSD-анализа. **Результаты и обсуждение.** После шлифовки поверхность стали имеет микротвердость 200 HV 0,1 и среднее арифметическое отклонение профиля поверхности  $Ra = 0,6$  мкм. УЗУО под углом  $\alpha = 90^\circ$  в среде индустриального масла приводит к упрочнению поверхности до 260 HV 0,1, при этом параметр  $Ra$  возрастает до 1,6 мкм. УЗУФО с отклонением направления ударного воздействия от вертикали в направлении поперечной подачи образца (обработка «углом вперед») позволяет получить относительно однородный микрорельеф с параметром  $Ra = 0,4$  мкм и микротвердостью деформированного слоя до 500 HV 0,1. Отклонение инструмента в противоположном направлении относительно поперечной подачи образца (обработка «углом назад») увеличивает степень упрочнения поверхности (620 HV 0,1), но ведет к формированию развитого микрорельефа, состоящего из пластических валиков вытесненного инструментом металла, и росту параметра  $Ra$  до 3,5 мкм. При этом шероховатость субмикрорельефа остается приблизительно на одном уровне ( $Ra = 0,03 \dots 0,04$  мкм) для всех трех схем упрочняющей обработки. Таким образом, угол и направление ударного воздействия при ультразвуковой поверхностной обработке можно рассматривать как важные технологические параметры, позволяющие в широких пределах управлять микрорельефом поверхности при реализации УЗУФО в качестве финишной упрочняющей обработки. УЗУФО является эффективным способом поверхностного упрочнения, позволяющим формировать поверхность даже с меньшей шероховатостью микропрофиля, чем после стандартной УЗУО с использованием смазки.

**Для цитирования:** Особенности формирования топографии поверхности конструкционной стали 09Г2С при ультразвуковой ударно-фрикционной упрочняющей обработке / Н.В. Лежнин, А.В. Макаров, С.Н. Лучко, Б.А. Логинов, А.Б. Логинов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 16–29. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-16-29.

#### \*Адрес для переписки

Лежнин Никита Владимирович, к.т.н., с.н.с.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,

ул. Софьи Ковалевской, 18,

620108, г. Екатеринбург, Россия

Тел.: +7-919-385-65-92, e-mail: [nlezhnin@bk.ru](mailto:nlezhnin@bk.ru)

## Введение

Состояние поверхности оказывает большое влияние на эксплуатационные свойства материала. Известно множество различных методов поверхностного модифицирования, таких как нанесение покрытий [1, 2], химико-термические обработки [3, 4], механические обработки при статическом [5] и динамическом воздействии и другие, позволяющие расширить область применения традиционных конструкционных сталей. Благодаря простоте и универсальности широкое распространение получили поверхностные деформационные обработки, при которых изменение структуры и улучшение свойств достигается в результате многократного ударного воздействия инструмента на поверхность металла. К таким способам относятся, в частности, дробеструйная обработка [6, 7], технология SMAT – обработка в вакууме шариками с ультразвуковой частотой [8, 9], ультразвуковая ударная обработка индентором (УЗУО) [10–12] и предложенная авторами ультразвуковая ударно-фрикционная обработка (УЗУФО) [13–15]. В отличие от традиционной УЗУО особенность УЗУФО заключается в приложении нагрузки под острым углом к обрабатываемой поверхности и без использования смазки. Этим достигается усиление сдвиговой деформации, вызванной фрикционной составляющей в процессе высокоэнергетического ударного воздействия, что позволяет в большей степени реализовать потенциал материала к упрочнению.

Поверхностные деформационные ударные обработки оказывают положительный эффект на износостойкость материала [16, 17], сопротивление коррозии [10, 18], усталостную стойкость [19, 20], а возможность получения наноструктуры в поверхностном слое открывает дополнительные возможности для улучшения свойств металлических материалов.

В отличие от поверхностных обработок, использующих в качестве деформирующего инструмента дробь или твердые гладкие шарики, ударяющие с разным усилием и под случайным углом к поверхности, УЗУО и УЗУФО позволяют точно контролировать условия обработки и формировать регулярный микрорельеф поверхности [21, 22].

Шероховатость поверхности является важной характеристикой материала, на которую

следует обращать внимание при выборе режима обработки. Большая шероховатость увеличивает потери на трение, а также снижает коррозионную стойкость поверхности и сопротивление усталостному разрушению. Как правило, при проведении УЗУО для обеспечения наилучшей шероховатости поверхности следует деформировать как можно более тонкий поверхностный слой материала, в то время как для существенного упрочнения требуется деформировать материал на возможно большую глубину. Эти противоположные условия сильно осложняют подбор режима, когда требуется обеспечить высокое упрочнение при низкой шероховатости поверхности [23, 24].

Микрорельеф стальной поверхности, формируемый в результате УЗУО и УЗУФО, зависит от твердости, исходной шероховатости поверхности [21], технологических параметров процесса обработки и в основном определяется профилем отдельных дорожек от каждого следующего прохода инструмента, разделенных пластическими валиками вытесненного из-под индентора металла. Поэтому важную роль играет скорость поперечной подачи (шаг сканирования) инструмента, которая определяет и производительность обработки.

Ранее было показано [15], что при проведении УЗУФО уменьшение угла между осью инструмента и обрабатываемой поверхностью приводит к смещению пластического валика вытесненного металла в направлении удара. Следовательно, положение инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой, относительно траектории его перемещения может оказывать сильное влияние на получаемый микрорельеф поверхности.

Таким образом, **цель настоящей работы** – изучить влияние направления ударного воздействия относительно поперечной подачи инструмента в процессе УЗУФО на шероховатость и степень упрочнения поверхности конструкционной стали 09Г2С.

## Методика исследований

Пластины из стали 09Г2С (масс. %: 0,09 С; 1,63 Mn; 0,60 Si; остальное – Fe) в состоянии поставки подвергали механической шлифовке и поверхностным деформационным обработкам УЗУО и УЗУФО.

Схемы УЗУФО представлены на рис. 1. В качестве деформирующего инструмента использовали индентор 1 из сплава ВК8 с радиусом полусферы  $R = 3$  мм, который крепился на волноводе 2 и магнестрикционном элементе 3, колеблющемся с частотой 22 кГц и амплитудой  $f = 20$  мкм. К инструменту прикладывали статическую нагрузку  $P = 149$  Н. Линейная скорость перемещения образца при возвратно-поступательном движении составляла  $V = 0,6$  м/мин с шагом сканирования (поперечной подачей образца)  $d = 0,2$  мм на один проход инструмента. Угол  $\alpha$  между направлением ударного воздействия (направлением приложения статической нагрузки  $P$ ) и поверхностью обрабатываемого образца 4 составлял  $90^\circ$  для традиционной УЗУО и  $50^\circ$  для УЗУФО.

УЗУФО проводили по двум схемам: 1) схема «углом вперед» (рис. 1, а), когда отклонение направления ударного воздействия от вертикали устанавливалось в сторону направления подачи образца  $d$ ; 2) схема «углом назад» (рис. 1, б), когда отклонение направления ударного воздействия инструмента от вертикали устанавливалось в сторону, обратную направлению подачи образца  $d$ . Соответственно УЗУО проводили

вертикально расположенным инструментом по схеме «под прямым углом».

УЗУО осуществляли с использованием индустриального масла И-40, а УЗУФО – в безокислительной среде аргона, который подавали в зону контакта через форсунку 5. Основные параметры режимов поверхностных деформационных обработок приведены в табл. 1.

Микрорельеф обработанной поверхности изучали с помощью оптического 3D-профилометра Wyko NT-1100. Исследование субмикрорельефа выполняли на сканирующем зондовом микроскопе SMM-2000 в режиме атомно-силовой микроскопии на сканере с полем  $40/40$  мкм [25]. В качестве зондов использовали кантилеверы фирмы Bruker, марки «MSCT» с радиусом закругления острия 2 нм и точностью измерения высоты рельефа 0,1 нм.

Микротвердость измеряли с помощью твердомера SHIMADZU HNV-G21DT по методу восстановленного отпечатка при нагрузке на индентор Виккерса 980 мН (100 гс).

Сканирующую электронную микроскопию поверхности выполняли на микроскопе TESCAN LIRA 3, оснащенной EBSD приставкой Oxford Instruments. Микроструктуру дефор-

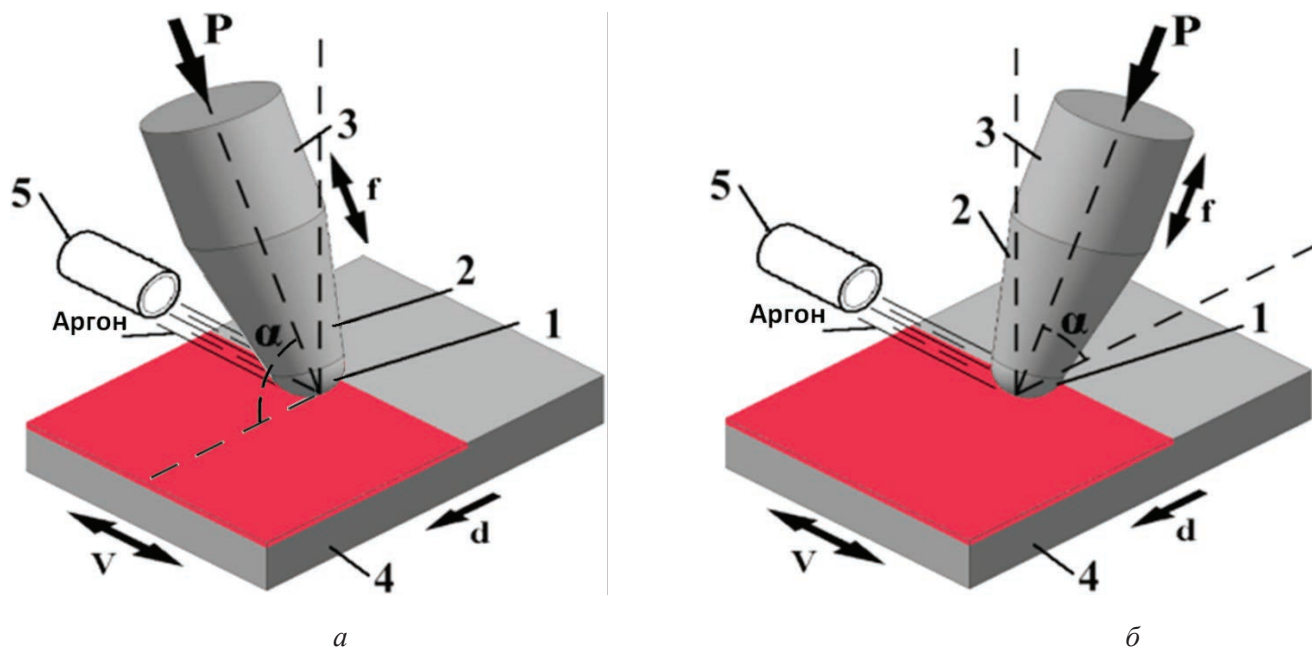


Рис. 1. Схемы ультразвуковой ударно-фрикционной обработки:  
а – «углом вперед»; б – «углом назад»

Fig. 1. The scheme of ultrasonic impact-frictional treatment:

а – impact direction opposite the sample feed direction (forehand); б – impact direction forward the sample feed direction (backhand)

**Параметры процесса ультразвуковых поверхностных упрочняющих обработок**  
**Parameters of the ultrasonic surface hardening treatments**

Вид обработки Treatment mode	Схема обработки Impacting scheme	$\alpha^\circ$	Среда обработки (СОТС) Treatment media
УЗУО UIT	«Под прямым углом» Vertical	90	Индустриальное масло И-40 Lubricant I-40
УЗУФО1 UIFT1	«Углом вперед» Forehand	50	Аргон Argon
УЗУФО2 UIFT2	«Углом назад» Backhand	50	Аргон Argon

мированного приповерхностного слоя исследовали методами EBSD-анализа и с помощью оптического микроскопа Альтами 1С на поперечных микрошлифах после полировки и травления 4 %-м спиртовым раствором пикриновой кислоты.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены СЭМ-изображения и поперечные профили поверхности образцов стали 09Г2С, иллюстрирующие различия микрорельефа в зависимости от ориентации направления удара относительно направления поперечной подачи образца при проведении ультразвуковых упрочняющих поверхностных обработок. Видно, что микрорельеф состоит из параллельных дорожек шириной порядка 200 мкм (рис. 2, а, б, в), что соответствует шагу сканирования.

Из рис. 2, а, г следует, что после традиционной УЗУО (с приложением ударной нагрузки по нормали к обрабатываемой поверхности) формируется периодический микрорельеф из гребней и впадин с некоторым искажением профиля дорожек из-за наложения каждого следующего прохода инструмента. Как показывают данные табл. 2, среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  и высота неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$  находятся на уровнях соответственно 1,6 и 7,0 мкм, что существенно выше параметров  $Ra$  и  $Rz$  для исходной шлифованной поверхности, равных 0,6 и 2,0 мкм. В случае УЗУФО1 (обработка «углом вперед») формируется относительно однородная поверхность без выраженных гребней, впадин и существенных дефектов (рис. 2, б, д). Наблюдается улучшение чистоты обработки

поверхности ( $Ra = 0,4$  мкм,  $Rz = 1,5$  мкм) по сравнению не только с УЗУО, но и с исходной шлифованной поверхностью (см. табл. 2). В случае УЗУФО2 (обработка «углом назад») на поверхности образца наблюдаются чешуйки и наплывы металла (рис. 2, е), вызванные пластической деформацией в процессе обработки по данной схеме. Обработанная поверхность имеет развитый микрорельеф с выраженными гребнями и впадинами (рис. 2, е). Это приводит к огрублению поверхности до значений параметров шероховатости  $Ra = 3,5$  мкм и  $Rz = 14,0$  мкм, максимальных для рассматриваемых технологических схем (см. табл. 2).

Микрорельеф, который формируется в результате стандартной УЗУО, зависит от исходной шероховатости поверхности и твердости обрабатываемого материала, усилия, с которым инструмент воздействует на материал, и шага подачи инструмента. Вытеснение металла из под индентора при его внедрении в материал под действием нагрузки вызывает образование пластических валиков с обеих сторон дорожки, которые в итоге и определяют шероховатость обработанной поверхности. Особенность УЗУФО – приложение ударного воздействия к обрабатываемой поверхности под углом  $\alpha$ , меньшим  $90^\circ$ . В [15] показано, что для  $\alpha$  в диапазоне  $90^\circ \dots 70^\circ$  шероховатость обработанной поверхности меняется слабо, в то время как уменьшение угла  $\alpha$  до  $50^\circ$  вызывает сильное смещение пластического валика в направлении удара и соответствующее существенное изменение микрорельефа обработанной поверхности. Данные рис. 2 и табл. 2 свидетельствуют, что параметры микрорельефа определяются не только углом наклона оси инструмента к обрабатываемой поверхности, но и



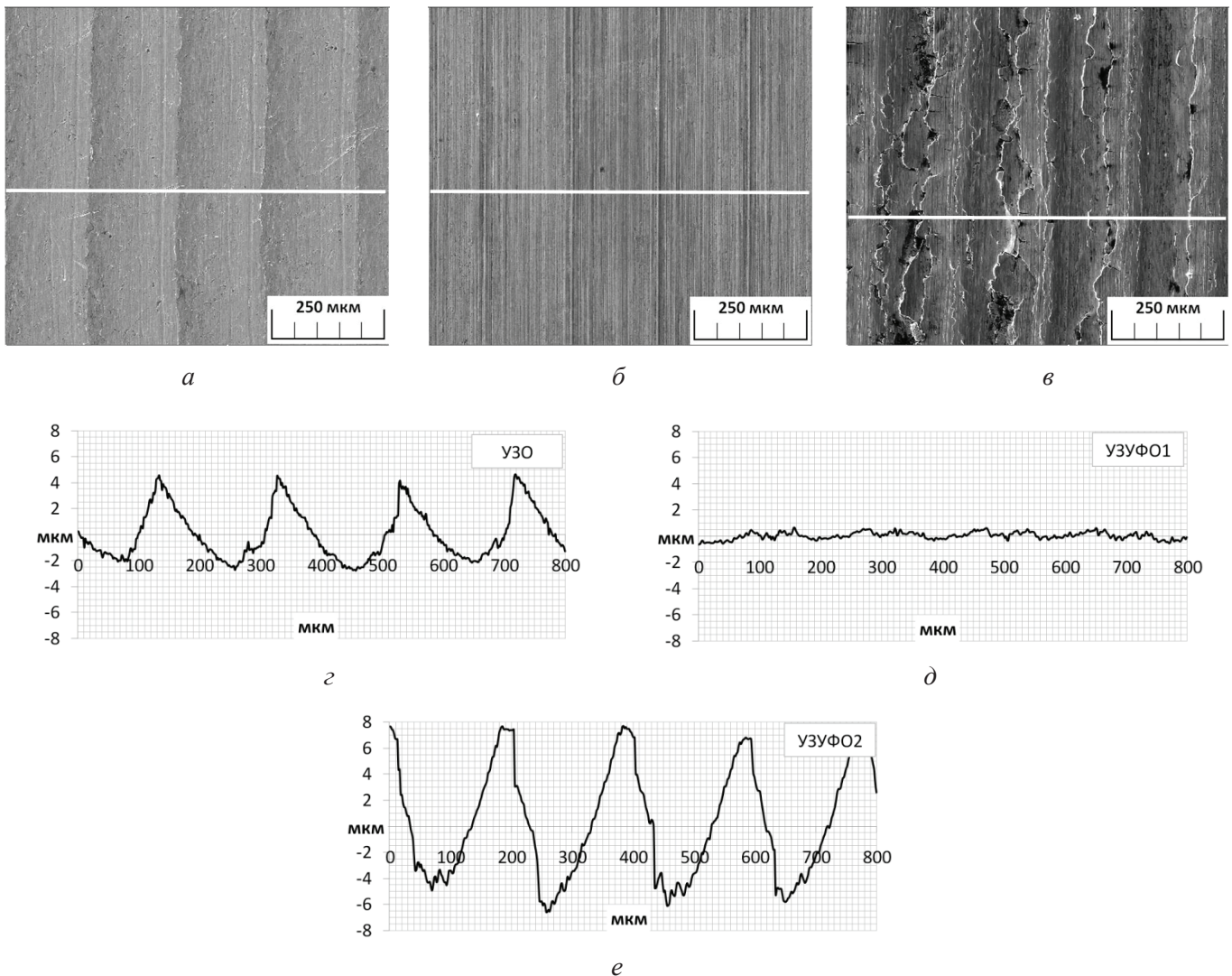


Рис. 2. СЭМ-изображения (а, б, в) и полученные методом оптической профилометрии поперечные профили (z, d, e) поверхности стали 09Г2С после различных видов ультразвуковых упрочняющих обработок:

а, z – УЗУО («под прямым углом»); б, d – УЗУФ01 («углом вперед»); в, e – УЗУФ02 («углом назад»)

Fig. 2. SEM-images (a, б, в) and cross-section 2D-profiles (z, d, e) of 09Mn2Si steel surface treated by various ultrasonic impact strengthening regimes:

а, z – UIT («Vertical»); б, d – UIFT1 («Forehand»); в, e – UIFT2 («Backhand»)

в значительной степени направлением ее отклонения от вертикали относительно поперечной подачи при проведении УЗУФО.

Если оптическая профилометрия дала возможность исследовать микрорельеф обработанной поверхности на участках поверхности размером 0,9×1,2 мм, то изучение существенно меньших участков поверхности (9,9×10,4 мкм) на сканирующем зондовом микроскопе в режиме атомно-силовой микроскопии позволяет анализировать субмикрорельеф поверхности после различных обработок. Согласно данным табл. 2 шероховатость субмикрорельефа после всех рассматриваемых видов ультразвуко-

вой обработки находится на одинаковом уровне ( $Ra = 0,03...0,04$  мкм) и, следовательно, не зависит от угла между направлением ударного воздействия и поверхностью обрабатываемого образца, а также от технологической среды обработки (индустриальное масло в случае УЗУО и аргон в случае УЗУФО).

На рис. 3, а–в показано, что субмикрорельеф поверхностей после всех трех видов обработки характеризуется наличием продольных выступов и впадин. Возникновение указанных субмикрорельефов связано, по-видимому, с воздействием на стальную поверхность микровыступов шероховатой поверхности твердосплавного

### Характеристики поверхности стали 09Г2С после различных режимов ультразвуковых упрочняющих поверхностных обработок

#### Surface characteristics of 09Mn2Si steel after various ultrasonic surface strengthening treatment modes

Вид обработки Treatment mode	Параметры шероховатости поверхности Surface roughness			Микротвердость Microhardness HV 0,1
	Микрорельеф Microrelief		Субмикрорельеф Submicrorelief	
	<i>Ra</i> , мкм	<i>Rz</i> , мкм	<i>Ra</i> , мкм	
Шлифовка Grinding	0,6	2,0	–	200±5
УЗУО UIT	1,6	7,0	0,03	260±10
УЗУФО1 UIFT1	0,4	1,5	0,04	500±20
УЗУФО2 UIFT2	3,5	14,0	0,04	620±30

индентора, совершающего передвижение (сканирование) со скоростью 0,6 м/с. На всех обработанных поверхностях отчетливо видны также параллельные субмикрорельефы, расположенные поперек направления движения инструмента (см. рис. 3, а–в). Анализ СЭМ-изображения микроучастка поверхности после УЗУФО показывает (рис. 3, г), что отмеченные параллельные субмикрорельефы располагаются с шагом ~400 нм, соответствующим расстоянию между соседними отпечатками индентора для скорости перемещения 0,6 м/мин при частоте колебаний индентора 22 кГц. Следовательно, субмикрорельефы образуются при наложении отдельных отпечатков от индентора, перемещающегося с определенной линейной скоростью и колеблющегося с ультразвуковой частотой.

В табл. 2 наряду с параметрами шероховатости на микро- и субмикроуровне приведены также значения микротвердости поверхности сталей после различных обработок. Видно, что по сравнению с микротвердостью исходной шлифованной поверхности (200 HV 0,1) УЗУО повышает микротвердость поверхности стали до 260 HV 0,1, т.е. на 30 %. УЗУФО обеспечивает существенно более эффективное деформационное упрочнение шлифованной поверхности: до 500 HV 0,1 (в 2,5 раза) при УЗУФО1 и до 620 HV 0,1 (в 3,5 раза) при УЗУФО2. Следова-

тельно, обработка УЗУФО1 («углом вперед») одновременно повышает и чистоту обработки поверхности, и уровень ее упрочнения по сравнению со стандартной УЗУО (см. табл. 2). Режим УЗУФО2 (обработка «углом назад») позволяет достигнуть еще более высокого уровня микротвердости поверхности, однако это сопровождается значительным ухудшением качества поверхности и возникновением грубого микрорельефа (см. рис. 2, в, е).

Структурными исследованиями на поперечных шлифах установлено, что исходная структура стали 09Г2С состоит из ферритных зерен размером 10...30 мкм и небольшого количества перлитных колоний (рис. 4, а, б). В результате УЗУФО2 в поверхностном слое формируется градиентная микроструктура (рис. 4, в, г), в которой можно выделить три области:

*a* – примыкающая к поверхности область с субмикроструктурными и нанокристаллическими (как показано в работе [14], методом просвечивающей электронной микроскопии) структурами;

*b* – область с сильнодеформированной вытянутой в направлении деформации структурой;

*c* – область с крупнокристаллической пластически деформированной структурой (деформированные зерна хорошо различимы на расстоянии 150 мкм от поверхности

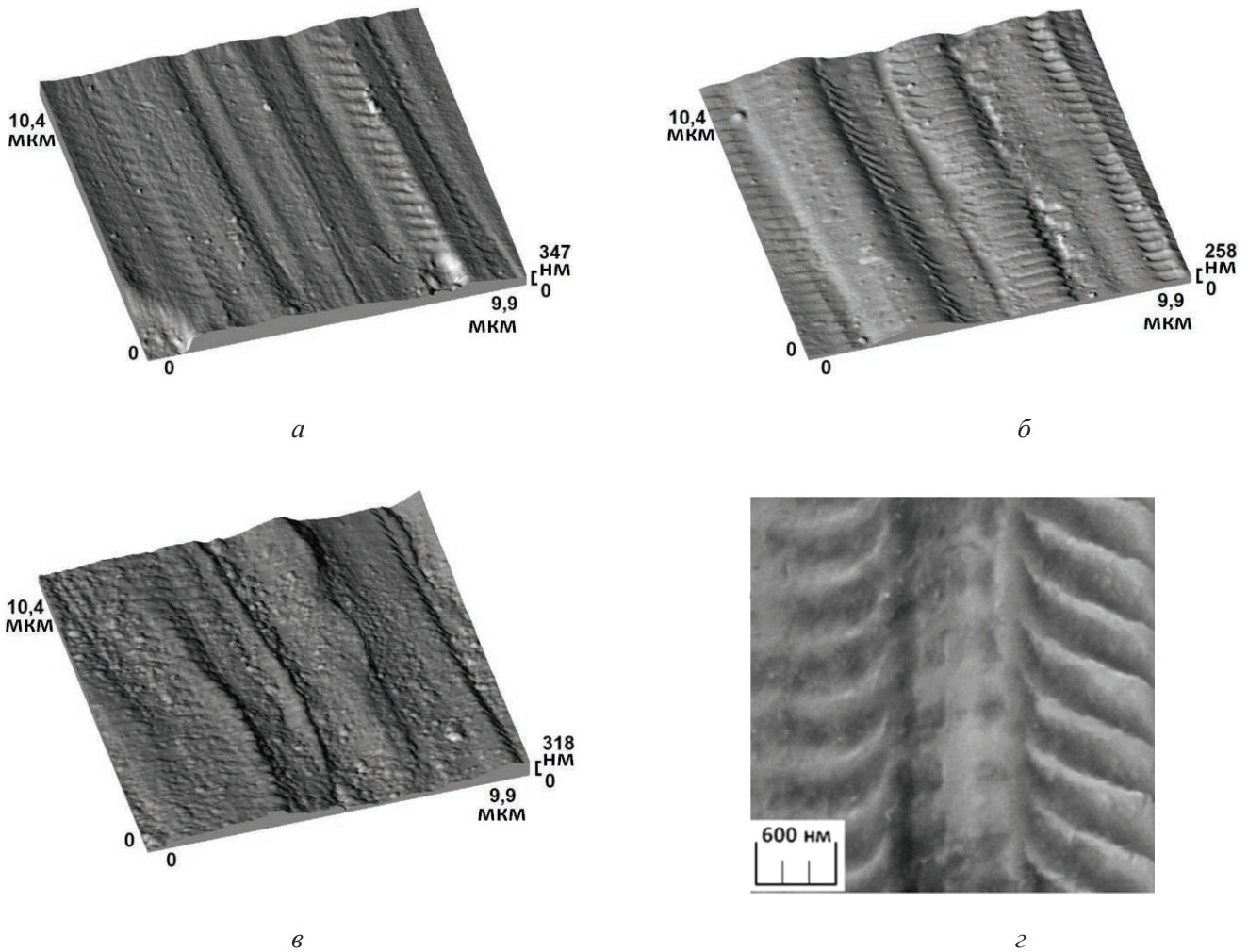


Рис. 3. 3D-профили субмикрорельефа поверхности стали 09Г2С, полученные методом сканирующей зондовой микроскопии (а–в) и СЭМ-изображение субмикрорельефа (г) после различных режимов ультразвуковой обработки:

а – УЗУО; б – УЗУФО1; в – УЗУФО2; г – УЗУФО1

Fig. 3. 3D-profiles of the 09Mn2Si steel surface submicrorelief obtained by scanning probe microscopy (a–в) and submicrorelief SEM-image (г) after various modes of ultrasonic impact treatment:

а – UIT; б – UIFT1; в – UIFT2; г – UIFT1

(см. рис. 4, в)), постепенно переходящей в исходную структуру.

Таким образом, обнаруженное повышенное деформационное упрочнение поверхности стали при УЗУФО можно объяснить эффективным диспергированием структуры металла поверхностного слоя. Приложение усилия под острым углом к обрабатываемой поверхности позволяет активизировать ротационную моду пластической деформации за счет усиления ее сдвиговой компоненты. Исключение смазки из зоны контакта также играет важную роль для повышения фрикционного взаимодействия инструмента с материалом (за счет роста коэффициента трения), а использование безокислительной среды

позволяет предотвратить охрупчивание сильно-деформированного слоя кислородом и накопить более высокую степень деформации без разрушения материала [26]. В совокупности это не только благоприятно влияет на эффективность измельчения зеренной структуры (см. рис. 4, г), но и значительно увеличивает толщину упрочненного слоя по сравнению с обработкой УЗУО (по нормали к поверхности с использованием жидкой смазки), что экспериментально установлено для стали 09Г2С в работе [15] измерениями микротвердости на поперечных шлифах.

Рассмотренные экспериментальные результаты не согласуются с выводами об уменьшении глубины деформации при наклонном ударе, сле-



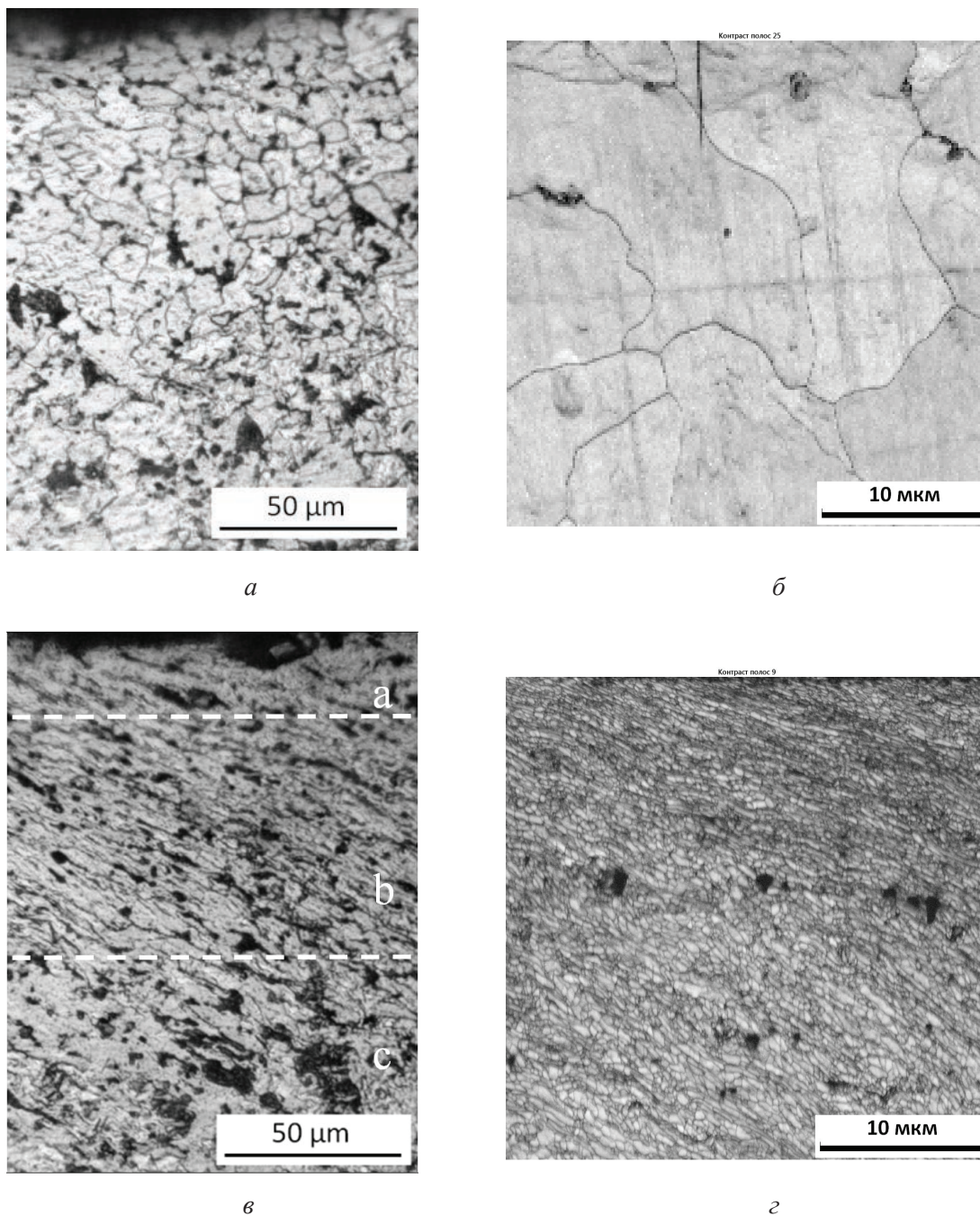


Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя стали 09Г2С после шлифовки (а, б) и ультразвуковой ударно-фрикционной обработки УЗУФО2 (в, г):

а, в – оптическая микроскопия; б, г – EBSD карта контрастности линий Кикучи

Fig. 4. Microstructure images of surface layer of 09Mn2Si steel after finish grinding (a, б) and ultrasonic impact-frictional treatment UIFT2 (в, г):

а, в – optical microscopy; б, г – EBSD image quality map

ланными в работах [27, 28] на основе компьютерного моделирования распределения полей деформации при однократном ударе дробью по нормали и под острым углом к поверхности. Очевидно, эти расхождения связаны с тем, что при моделировании рассматривалось однократное ударное воздействие без учета трения, т.е. фрикционной составляющей деформации, на

введении которой и основан предложенный в работах [13–15] способ УЗУФО.

Наблюдаемые при УЗУФО1 (по сравнению с УЗУФО2) существенно (в 9 раз) более низкие значения параметров шероховатости  $Ra$  и  $Rz$  микрорельефа, более качественная поверхность обработанной стали при одновременном несколько меньшем уровне ее деформационного упрочне-



ния (см. табл. 2, рис. 2) являются следствием технологических особенностей ультразвуковой обработки по схеме «углом вперед» – УЗУФО1 (см. рис. 1, а). Достижимое при такой обработке сглаживание микрорельефа, вероятно, связано с отделением от обрабатываемой поверхности пластически деформированного валика материала, формирующегося перед индентором, в результате его перенаклепа из-за многократной деформации при каждом последующем проходе инструмента. Это приводит к некоторой потере массы по механизму, описанному в работе [29], и соответствующему уменьшению толщины деформированного слоя за счет разрушения (удаления) наиболее упрочненного металла с поверхности (что и определяет меньший уровень упрочнения стали при УЗУФО1).

Из полученных результатов следует, что предложенная технология УЗУФО помимо эффективного деформационного упрочнения позволяет также формировать поверхность конструкционной стали с параметрами шероховатости, отличающимися почти на порядок. При этом не только угол ударного воздействия, но и направление поперечной подачи при сканировании колеблющимся индентором являются важными технологическими параметрами, расширяющими возможности управления характеристиками микрорельефа поверхности.

### Выводы

1. Изучено формирование топографии и микротвердости поверхности конструкционной стали 09Г2С в зависимости от схемы нового метода ультразвуковой ударно-фрикционной обработки (УЗУФО): с отклонением направления ударного воздействия от вертикали в направлении поперечной подачи образца (обработка «углом вперед») и в противоположном направлении (обработка «углом назад»). Установлено, что при реализации УЗУФО в среде аргона под углом  $\alpha = 50^\circ$  к обрабатываемой поверхности направление ударного воздействия относительно направления подачи инструмента является важным технологическим параметром, позволяющим управлять параметрами шероховатости микрорельефа поверхности в широких пределах.

2. На шлифованной поверхности стали с исходной микротвердостью 200 HV 0,1 и параме-

тром шероховатости  $Ra = 0,6$  мкм проведением УЗУФО «углом вперед» формируется сильнодеформированный градиентный слой с существенно более высокой микротвердостью (500 HV 0,1) и меньшей шероховатостью ( $Ra = 0,4$  мкм) поверхности, чем при стандартной ультразвуковой ударной обработке под углом  $\alpha = 90^\circ$  с использованием смазки (260 HV 0,1;  $Ra = 1,6$  мкм). УЗУФО «углом назад» обеспечивает максимальное упрочнение стали (до 620 HV 0,1), однако формирует поверхность с грубым микрорельефом ( $Ra = 3,5$  мкм).

3. Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что после всех режимов ультразвуковой обработки субмикрорельеф поверхности стали имеет подобную морфологию и близкий параметр шероховатости ( $Ra = 0,03 \dots 0,04$  мкм).

### Список литературы

1. Advanced characterization methods for wear resistant hard coatings: a review on recent progress / M. Tkadletz, N. Schalk, R. Daniel, J. Keckes, C. Czettel, C. Mitterer // *Surface & Coating Technology*. – 2016. – Vol. 285. – P. 31–46. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.11.016.
2. Получение упрочняющих покрытий из аморфизуемых сплавов FE-CR-SI-B-C лазерно-плазменными методами / М.Н. Хомяков, П.А. Пинаев, П.А. Стаценко, И.Б. Мирошниченко, Г.Н. Грачев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 21–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-21-34.
3. Corrosion resistance of low-carbon steel modified by plasma nitriding and diamond-like carbon / C.P. Fenili, F.S. de Souza, G. Marin, S.M.H. Probst, C. Binder, A.N. Klein // *Diamond and Related Materials*. – 2017. – Vol. 80. – P. 153–161. – DOI: 10.1016/j.diamond.2017.11.001.
4. Влияние низкотемпературной цементации в плазме электронного пучка на упрочнение и шероховатость поверхности метастабильной аустенитной стали / П.А. Скорынина, А.В. Макаров, А.И. Меньшаков, А.Л. Осинцева // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 97–109. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-97-109.
5. Блюментейн В.Ю., Кукареко В.А. Структурные превращения в поверхностном слое при обработке мультирадиусным деформирующим инструментом // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 2. –

C. 75–86. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-75-86.

6. Effect of shot peening using ultra-fine particles on fatigue properties of 5056 aluminum alloy under rotating bending / S. Kikuchi, Y. Nakamura, K. Nambu, M. Ando // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 652. – P. 279–286. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.11.076.

7. Experimental study on macro- and microstress state, microstructural evolution of austenitic and ferritic steel processed by shot peening / M. Chen, C. Jiang, Z. Xu, K. Zhan, V. Ji // *Surface & Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 359. – P. 511–519. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.12.097.

8. Lu K., Lu J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – Vol. 375–377. – P. 38–45. – DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.261.

9. Progress in mechanical properties of gradient structured metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment / X. Yang, H. Pan, J. Zhang, H. Gao, B. Shu, Y. Gong, X. Zhu // *Materials Transactions*. – 2019. – Vol. 60, iss. 8. – P. 1543–1552. – DOI: 10.2320/matertrans.MF201911.

10. Microstructure and surface properties of 17-4PH stainless steel by ultrasonic surface rolling technology / Q. Zhang, Z. Hu, W. Su, H. Zhou, C. Liu, Y. Yang, X. Qi // *Surface & Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 321. – P. 64–73. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.04.052.

11. Enhanced mechanical behaviors of gradient nano-grained austenite stainless steel by means of ultrasonic impact treatment / X. Yang, X. Wang, X. Ling, D. Wang // *Results in Physics*. – 2017. – Vol. 7. – P. 1412–1421. – DOI: 10.1016/j.rinp.2017.04.002.

12. The effect of ultrasonic impact treatment on the deformation behavior of commercially pure titanium under uniaxial tension / A.V. Panin, M.S. Kazachenok, A.I. Kozelskaya, R.R. Balokhonov, V.A. Romanova, O.B. Perevalova, Yu.I. Pochivalov // *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 117, iss. 5. – P. 371–381. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.01.006.

13. Патент 2643289 Российская Федерация. Способ ультразвуковой упрочняющей обработки деталей / Макаров А.В., Малыгина И.Ю., Буров С.В., Саврай П.А. – № 2016126583; заявл. 01.07.2016; опубл. 31.01.2018, Бюл. № 4. – 16 с.: ил.

14. Nanostructuring and surface hardening of structural steels by ultrasonic impact-frictional treatment / A.V. Makarov, R.A. Savrai, I.Yu. Malygina, E.G. Volkova, S.V. Burov // *AIP Conference Proceed-*

*ings*. – 2018. – Vol. 2053, iss. 1. – P. 020006-1–020006-5. – DOI: 10.1063/1.5084352.

15. Lezhnin N.V., Makarov A.V., Luchko S.N. The effect of ultrasonic impact-frictional treatment on the surface roughness and hardening of 09Mn2Si constructional steel // *Letters on Materials*. – 2019. – Vol. 9, iss. 3. – P. 310–315. – DOI: 10.22226/2410-3535-2019-3-310-315.

16. Influence of multiple ultrasonic impact treatments on surface roughness and wear performance of SUS301 steel / L. Li, M. Kim, S. Lee, M. Bae, D. Lee // *Surface & Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 307. – P. 517–524. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.023.

17. Chamgordani S.A., Miresmaeili R., Aliofkhaeizadeh M. Improvement in tribological behavior of commercial pure titanium (CP-Ti) by surface mechanical attrition treatment (SMAT) // *Tribology International*. – 2018. – Vol. 119. – P. 744–752. – DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.044.

18. Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI-321 stainless steel / B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko, M.A. Vasylyev, M.O. Iefimov // *Material Science and Engineering: A*. – 2007. – Vol. 458. – P. 253–261. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.12.049.

19. Influence of re-ultrasonic impact treatment on fatigue behaviors of S690QL welded joints / Y. Liu, D. Wang, C. Deng, L. Xia, L. Huo, L. Wang, B. Gong // *International Journal of Fatigue*. – 2014. – Vol. 66. – P. 155–160. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.03.024.

20. Comparative study of the effects of surface mechanical attrition treatment and conventional shot peening on low cycle fatigue of a 316L stainless steel / J. Zhoua, D. Reintanta, Z. Suna, P. Kanouté // *Surface & Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 349. – P. 556–566. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.06.041.

21. Kovalevskaya Zh.G., Uvarin P.V., Tolmachev A.I. Some features of the formation of the surface microrelief of steel under ultrasonic finishing treatment // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2012. – Vol. 48, iss. 3. – P. 153–158. – DOI: 10.1134/S1061830912030047.

22. A two-step periodic micro-nano patterning process via ultrasonic impact treatment on a rough SUS301 stainless steel surface / L. Li, M. Kim, S. Lee, T. Kim, J. Lee, D. Lee // *Surface & Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 330. – P. 204–210. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.10.004.

23. Алехин В.П., Алехин О.В. Нанотехнология поверхностной упрочняющей и финишной обработки деталей из конструкционных и инструментальных сталей // *Машиностроение и инженерное образование*. – 2007. – № 4 (13). – С. 2–13.

24. Mechanisms of surface roughening of commercial purity titanium during ultrasonic impact treatment / A.V. Panin, M.S. Kazachenok, A.I. Kozelskaya, R.R. Hairullin, E.A. Sinyakova // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 647. – P. 43–50. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.08.086.

25. Зондовая микроскопия: применения и рекомендации по разработке / Б.А. Логинов, П.Б. Логинов, В.Б. Логинов, А.Б. Логинов // *Наноиндустрия*. – 2019. – Т. 12, № 6 (92). – С. 352–364.

26. *Makarov A.V., Korshunov L.G.* Metallophysical foundations of nanostructuring frictional treatment of steels // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2019. – Vol. 120, iss. 3. – P. 303–311. – DOI: 10.1134/S0031918X18120128.

27. On the application of the Kitagawa–Takahashi diagram to foreign-object damage and high-cycle fatigue / J.O. Peters, B.L. Boyce, X. Chen, J.M. McNaney, J.W. Hutchinson, R.O. Ritchie // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2002. – Vol. 69. – P. 1425–1446. – DOI: 10.1016/S0013-7944(01)00152-7.

28. *Mordyuk B.N., Prokopenko G.I.* Ultrasonic impact peening for the surface properties' management // *Journal of Sound and Vibration*. – 2007. – Vol. 308. – P. 855–866. – DOI: 10.1016/j.jsv.2007.03.054.

29. *Arifvianto B., Mahardika M.* Effects of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on a rough surface of AISI 316L stainless steel // *Applied Surface Science*. – 2012. – Vol. 258. – P. 4538–4543. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.01.021.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

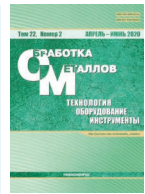
© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)





# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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







## The Effect of Ultrasonic Impact-Friction Treatment on a Surface Roughness of 09Mn2Si Structural Steel

*Nikita Lezhnin*<sup>1, a, \*</sup>, *Alexey Makarov*<sup>1, b</sup>, *Sergey Luchko*<sup>1, c</sup>, *Boris Loginov*<sup>2, d</sup>, *Artem Loginov*<sup>3, e</sup>



<sup>1</sup> M.N. Miheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 Sofia Kovalevskaya st., Yekaterinburg, 620219, Russian Federation

<sup>2</sup> National Research University of Electronic Technology - MIET, Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russian Federation

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9483-6607>,  [nlezhnin@bk.ru](mailto:nlezhnin@bk.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>,  [avm@imp.uran.ru](mailto:avm@imp.uran.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2368-0913>,  [serojaluchko@gmail.com](mailto:serojaluchko@gmail.com), <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5081-1424>,  [b-loginov@mail.ru](mailto:b-loginov@mail.ru),

<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-2090-5301>,  [loginov.ab15@physics.msu.ru](mailto:loginov.ab15@physics.msu.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 20 March 2020

Revised: 20 April 2020

Accepted: 11 May 2020

Available online: 15 June 2020

#### Keywords:

Surface strain hardening  
 Ultrasonic impact treatment  
 Surface roughness  
 Structural steel

#### Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Education and Science of the Russian Federation on themes No. AAAA-A18-118020190116-6, supported by RFBR (project No. 18-38-00868).

### ABSTRACT

**Introduction.** Ultrasonic impact-frictional treatment (UIFT) is a new method of surface strain hardening that improves the properties and refines the microstructure of the surface layer of metallic material. Unlike traditional ultrasonic impact treatment (UIT), the UIFT applies impacts with ultrasonic frequency at an acute angle  $\alpha$  to the metal surface in order to activate the shear deformation mode. Oxygen-free atmosphere of argon enhances friction and prevents embrittlement of the diffusion-active deformed layer. A decrease of the angle  $\alpha$  during the UIFT leads to a shift of the metal displaced by the tool towards the impact. Therefore, the tool position, oscillating with an ultrasonic frequency, with respect to the tool trajectory may have a profound effect on the surface microrelief. **Objective** is studying the influence of the impact direction on the roughness and hardening degree of the 09Mn2Si structural steel surface regarding the tool cross-feed during UIFT at an angle  $\alpha = 50^\circ$  in the argon medium. **Research Methods** are following: microhardness measurements, atomic force microscopy (AFM), optical profilometry, optical microscopy and scanning electron microscopy with EBSD analysis. **Results and discussion.** After grinding, the steel surface microhardness is 200 HV0.1 and the arithmetic mean deviation of the surface profile is  $Ra = 0.6 \mu\text{m}$ . UIT at an angle  $\alpha = 90^\circ$  in an industrial oil medium results in the surface hardening up to 260 HV0.1, while the Ra parameter increases to  $1.6 \mu\text{m}$ . UIFT with the impact vertical deviation towards the specimen cross-feed (forehand) provides a relatively uniform microrelief with  $Ra = 0.4 \mu\text{m}$  and the deformed layer microhardness of up to 500 HV0.1. The tool deviation in the contrary direction towards the specimen cross-feed (backhand) increases the surface hardening degree (620 HV0.1), but leads to the formation of an advanced microrelief consisting of shifted metal displaced by the tool, as well as to the Ra parameter increase up to  $3.5 \mu\text{m}$ . At the same time, the submicrorelief roughness remains approximately at the same level ( $Ra = 0.03\text{--}0.04 \mu\text{m}$ ) for all three hardening treatment methods. Thus, the angle and impact direction during ultrasonic hardening treatment are important technological parameters that allow long-range controlling of the surface microrelief with the UIFT applied as a finishing hardening treatment. UIFT is an effective method of surface hardening, intended to form a surface even with a lower roughness of the microprofile compared to that of a traditional grease-applied UIT.

**For citation:** *Lezhnin N.V., Makarov A.V., Luchko S.N., Loginov B.A., Loginov A.B.* The effect of ultrasonic impact-friction treatment on a surface roughness of 09Mn2Si structural steel. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 16–29. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-16-29. (In Russian).

#### \* Corresponding author

*Lezhnin Nikita V.*, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher  
 M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS,  
 18 S. Kovalevskaya St.,  
 Ekaterinburg, 620108, Russian Federation  
 Tel.: +7-919-385-65-92, e-mail: [nlezhnin@bk.ru](mailto:nlezhnin@bk.ru)

## References

1. Tkadletz M., Schalk N., Daniel R., Keckes J., Czettel C., Mitterer C. Advanced characterization methods for wear resistant hard coatings: a review on recent progress. *Surface & Coating Technology*, 2016, vol. 285, pp. 31–46. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.11.016.
2. Khomyakov M.N., Pinaev P.A., Statsenko P.A., Miroshnichenko I.B., Grachev G.N. Poluchenie uprochnyayushchikh pokrytii iz amorfiziruemykh splavov FE-CR-SI-B-C lazerno-plazmennymi metodami [Formation of hardening coatings based on Fe-Cr-Si-B-C alloys with high glass-forming ability by laser-plasma methods]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 21–34. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-21-34. (In Russian).
3. Fenili C.P., Souza F.S. de, Marin G., Probst S.M.H., Binder C., Klein A.N. Corrosion resistance of low-carbon steel modified by plasma nitriding and diamond-like carbon. *Diamond and Related Materials*, 2017, vol. 80, pp. 153–161. DOI: 10.1016/j.diamond.2017.11.001.
4. Skorynina P.A., Makarov A.V., Men'shakov A.I., Osintseva A.L. Vliyanie nizektemperaturnoi tsementatsii v plazme elektronogo puchka na uprochnenie i sherokhovatost' poverkhnosti metastabil'noi austenitnoi stali [Effect of low-temperature carburization in electron beam plasma on the hardening and surface roughness of the metastable austenitic steel]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 97–109. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-97-109. (In Russian).
5. Blumenstein V., Kukareko V. Strukturnye prevrashcheniya v poverkhnostnom sloe pri obrabotke mul'tiradiusnym deformiruyushchim instrumentom [Structural transformations in the surface layer during multiradius deforming tool processing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 75–86. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-75-86. (In Russian).
6. Kikuchi S., Nakamura Y., Nambu K., Ando M. Effect of shot peening using ultra-fine particles on fatigue properties of 5056 aluminum alloy under rotating bending. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 652, pp. 279–286. DOI: 10.1016/j.msea.2015.11.076.
7. Chen M., Jiang C., Xu Z., Zhan K., Ji V. Experimental study on macro- and microstress state, microstructural evolution of austenitic and ferritic steel processed by shot peening. *Surface & Coatings Technology*, 2019, vol. 359, pp. 511–519. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.12.097.
8. Lu K., Lu J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 38–45. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.261.
9. Yang X., Pan H., Zhang J., Gao H., Shu B., Gong Y., Zhu X. Progress in mechanical properties of gradient structured metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment. *Materials Transactions*, 2019, vol. 60, iss. 8, pp. 1543–1552. DOI: 10.2320/matertrans.MF201911.
10. Zhang Q., Hu Z., Su W., Zhou H., Liu C., Yang Y., Qi X. Microstructure and surface properties of 17-4PH stainless steel by ultrasonic surface rolling technology. *Surface & Coatings Technology*, 2017, vol. 321, pp. 64–73. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.04.052.
11. Yang X., Wang X., Ling X., Wang D. Enhanced mechanical behaviors of gradient nano-grained austenite stainless steel by means of ultrasonic impact treatment. *Results in Physics*, 2017, vol. 7, pp. 1412–1421. DOI: 10.1016/j.rinp.2017.04.002.
12. Panin A.V., Kazachenok M.S., Kozelskaya A.I., Balokhonov R.R., Romanova V.A., Perevalova O.B., Pochivalov Yu.I. The effect of ultrasonic impact treatment on the deformation behavior of commercially pure titanium under uniaxial tension. *Materials & Design*, 2017, vol. 117, iss. 5, pp. 371–381. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.01.006.
13. Makarov A.V., Malygina I.Yu., Burov S.V., Savraj R.A. *Sposob ultrazvukovoi uprochniauchei obrabotki detalei* [Method of ultrasonic simple processing of details]. Patent RF, no. 2643289, 2018.
14. Makarov A.V., Savraj R.A., Malygina I.Yu., Volkova E.G., Burov S.V. Nanostructuring and surface hardening of structural steels by ultrasonic impact-frictional treatment. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2053, iss. 1, pp. 020006-1–020006-5. DOI: 10.1063/1.5084352.
15. Lezhnin N.V., Makarov A.V., Luchko S.N. The effect of ultrasonic impact-frictional treatment on the surface roughness and hardening of 09Mn2Si constructional steel. *Letters on Materials*, 2019, vol. 9, iss. 3, pp. 310–315. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-3-310-315.
16. Li L., Kim M., Lee S., Bae M., Lee D. Influence of multiple ultrasonic impact treatments on surface roughness and wear performance of SUS301 steel. *Surface & Coatings Technology*, 2016, vol. 307, pp. 517–524. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.023.

17. Chamgordani S.A., Miresmaeili R., Aliofkhazraei M. Improvement in tribological behavior of commercial pure titanium (CP-Ti) by surface mechanical attrition treatment (SMAT). *Tribology International*, 2018, vol. 119, pp. 744–752. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.044.
18. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I., Vasylyev M.A., Iefimov M.O. Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI-321 stainless steel. *Material Science and Engineering: A*, 2007, vol. 458, pp. 253–261. DOI: 10.1016/j.msea.2006.12.049.
19. Liu Y., Wang D., Deng C., Xia L., Huo L., Wang L., Gong B. Influence of re-ultrasonic impact treatment on fatigue behaviors of S690QL welded joints. *International Journal of Fatigue*, 2014, vol. 66, pp. 155–160. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.03.024.
20. Zhoua J., Retrainta D., Suna Z., Kanouté P. Comparative study of the effects of surface mechanical attrition treatment and conventional shot peening on low cycle fatigue of a 316L stainless steel. *Surface & Coatings Technology*, 2018, vol. 349, pp. 556–566. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.06.041.
21. Kovalevskaya Zh.G., Uvarkin P.V., Tolmachev A.I. Some features of the formation of the surface microrelief of steel under ultrasonic finishing treatment. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, iss. 3, pp. 153–158. DOI: 10.1134/S1061830912030047.
22. Li L., Kim M., Lee S., Kim T., Lee J., Lee D. A two-step periodic micro-nano patterning process via ultrasonic impact treatment on a rough SUS301 stainless steel surface. *Surface & Coatings Technology*, 2017, vol. 330, pp. 204–210. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.10.004.
23. Alekhin V.P., Alekhin O.V. Nanotekhnologiya poverkhnostnoi uprochnyayushchei i finishnoi obrabotki detalei iz konstruktsionnykh i instrumental'nykh stalei [Nanotechnology of surface hardening and finishing processing of parts from structural and tool steels]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie = Mechanical engineering and engineering education*, 2007, no. 4 (13), pp. 2–13.
24. Panin A.V., Kazachenok M.S., Kozelskaya A.I., Hairullin R.R., Sinyakova E.A. Mechanisms of surface roughening of commercial purity titanium during ultrasonic impact treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 647, pp. 43–50. DOI: 10.1016/j.msea.2015.08.086.
25. Loginov B.A., Loginov P.B., Loginov V.B., Loginov A.B. Zondovaya mikroskopiya: primeneniya i rekomendatsii po razrabotke [Probe microscopy: applications and development recommendations]. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2019, vol. 12, no. 6 (92), pp. 352–364.
26. Makarov A.V., Korshunov L.G. Metallophysical foundations of nanostructuring frictional treatment of steels. *The Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120, iss. 3, pp. 303–311. DOI: 10.1134/S0031918X18120128.
27. Peters J.O., Boyce B.L., Chen X., McNaney J.M., Hutchinson J.W., Ritchie R.O. On the application of the Kitagawa–Takahashi diagram to foreign-object damage and high-cycle fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002, vol. 69, pp. 1425–1446. DOI: 10.1016/S0013-7944(01)00152-7.
28. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, vol. 308, pp. 855–866. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.03.054.
29. Arifvianto B., Mahardika M. Effects of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on a rough surface of AISI 316L stainless steel. *Applied Surface Science*, 2012, vol. 258, pp. 4538–4543. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.01.021.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 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/>).