ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ / TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА КОМБИНИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ (ОБЗОР)

Обзор

Петроченко С.В.[1, *], Бисерикан М.И.[2]
[1] ORCID : 0000-0001-5600-835X;
[2] ORCID : 0000-0001-8862-515X;
[1, 2] Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Российская Федерация
[1] Научно-исследовательский институт интеллектуального станкостроения, Нинбо, Китай

* Корреспондирующий автор (c.o.r.d.84[at]mail.ru)

Аннотация

В данном обзоре приведена оценка влияния параметров режима комбинированной лазерно-ультразвуковой упрочняющей обработки на качество поверхности и поверхностного слоя. Представлено как температура нагрева поверхности и скорость обработки при осуществлении лазерной закалки, амплитуда колебаний ультразвукового инструмента и время ультразвуковой обработки, а также последовательность операций влияют на шероховатость, твердость и износостойкость поверхности, глубину упрочненного слоя, остаточные напряжения в поверхностном слое. Сделано заключение в виде рекомендаций по подбору параметров режима лазерно-ультразвуковой обработки для получения заданных качества поверхности и поверхностного слоя стальных деталей.

Ключевые слова: качество поверхности и поверхностного слоя, лазерная закалка, ультразвуковая обработка, комбинированная лазерно-ультразвуковая упрочняющая обработка.

AN EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE IMPACTS OF COMBINED LASER-ULTRASOUND TREATMENT MODE ON THE QUALITY OF THE SURFACE AND SURFACE LAYER OF STEEL DETAILS (A REVIEW)

Review article

Petrochenko S.V.[1, *], Biserikan M.I.[2]
[1] ORCID : 0000-0001-5600-835X;
[2] ORCID : 0000-0001-8862-515X;
[1, 2] Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation
[1] China Innovation Academy of Intelligent Equipment Co., Ltd., Ningbo, China

* Corresponding author (c.o.r.d.84[at]mail.ru)

Abstract

This review evaluates the influence of parameters of the combined laser and ultrasonic hardening treatment mode on the quality of the surface and the surface layer. It is shown how the temperature of surface heating and processing speed in the implementation of laser hardening, the amplitude of oscillation of the ultrasonic tool and ultrasonic treatment time, as well as the sequence of operations influence the surface grit, hardness and wear resistance, the depth of the hardened layer, residual stresses in the surface layer. The conclusion is made in the form of recommendations on the selection of parameters of the laser and ultrasonic treatment mode to obtain the specified quality of the surface and the surface layer of steel parts.

Keywords: surface and surface layer quality, laser hardening, ultrasonic treatment, combined laser and ultrasonic strengthening treatment.

Введение

Одной из основных тенденций современного машиностроения является растущая потребность в улучшении качества, повышения надежности и долговечности выпускаемых изделий. Для машин и механизмов технологического назначения, к которым относятся и различные приводы подач винт-гайка скольжения и качения, линейные направляющие, червячные передачи металлорежущих станков и другого оборудования, требования к качеству связаны с необходимостью повышения точности и производительности, характеризуемые эксплуатационными свойствами их деталей и сопряжений. Низкие показатели качества и эксплуатационных свойств поверхности и поверхностных слоев деталей винтовых передач, линейных направляющих, как правило, не обеспечивают их высокую точность, плавность перемещений рабочего органа, жесткость, надежность и долговечность работы.

Характерной особенностью, определяющей работу данных передач, является неравномерность изнашивания вдоль образующих винтовых поверхностей контактирующих деталей, которая вызывается неравномерностью нагрузки на витки резьбы и скорости перемещения, многократными смещениями контактирующих поверхностей друг относительно друга, повторными нагрузками, попаданием в зону контакта посторонних частиц, что приводит к дополнительным пластическим деформациям, усталостному разрушению сопрягаемых поверхностей и возникновению процессов микрорезания, задирам. Указанное вызывает достаточно быструю потерю работоспособности передач.

Анализ возможностей в обеспечении износостойкости и других эксплуатационных свойств показал, что существенный эффект может достигаться за счет использования методов поверхностного пластического деформирования (ППД). Наиболее перспективным из них являются: вибронакатывание (ВН), вибровыглаживание (ВВГ), ультразвуковая обработка (УЗО), позволяющие изменять характеристики поверхностных тонких слоев металла для достижения благоприятной совокупности свойств и оптимальной структуры

Благодаря своим преимуществам эти способы получили широкое распространение, а механизм и процессы формирования параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностного слоя подвергаются глубоким исследованиям. Однако возможности их, особенно для упрочнения поверхностей сложнофасонного профиля (витков резьбы ходовых винтов и других деталей), далеко не исчерпаны и мало изучены. В связи с чем очевидна необходимость создания и исследования новых, более эффективных способов обработки.

Помимо методов ППД используются и традиционные методы термической обработки материалов – закалка токами высокой частоты и лазерная закалка (ЛЗ), которые в сочетании с ППД способны в значительной степени улучшить эксплуатационные свойства пар трения. Такая обработка уже относится к разряду комбинированных видов обработки. А лазерная закалка в сочетании с ультразвуковой обработкой получила название лазерно-ультразвуковой упрочняющей обработки.

Оптимальные режимы лазерно-ультразвуковой упрочняющей обработки должны обеспечить заданные значения твердости, шероховатости, износостойкости, глубины упрочненного слоя, минимальных значений деформации готовых изделий.

Лазерно-ультразвуковая упрочняющая обработка является комбинированной и обе технологических операции обработки могут быть проведены как отдельные, но последовательно проводимые операции, или быть объединены в совмещенную операцию.

Огромное количество работ посвящено как ЛЗ, так и УЗО. Публикаций, посвященных комбинированной лазерно-ультразвуковой упрочняющей обработке не так много, а в отношении сталей, применяемых при производстве линейных направляющих и ходовых винтов для станков с ЧПУ, практически не встречаются вовсе. В данном обзоре будет представлен анализ публикаций, посвященных параметрам режима комбинированной лазерно-ультразвуковой обработки.

Анализ публикаций, посвященных комбинированной лазерно-ультразвуковой упрочняющей обработке

Основные результаты исследований, посвященные комбинированной лазерно-ультразвуковой упрочняющей обработке отражены в работах [1], [4], [9], [12].

Влияние параметров режима комбинированной лазерно-ультразвуковой упрочняющей обработки на шероховатость поверхности рассмотрено в работе [1].

Материал обрабатываемой заготовки – инструментальная сталь марки D2. ЛЗ проводилась со скоростью сканирования V = 1000 мм/с, температура закалки варьировалась от 900 °С до 1340 °С. Скорость движения заготовки S = 40 – 140 мм/мин. Схема обработки представлена на рис. 1. Режимы ЛЗ приведены в таблице 1.

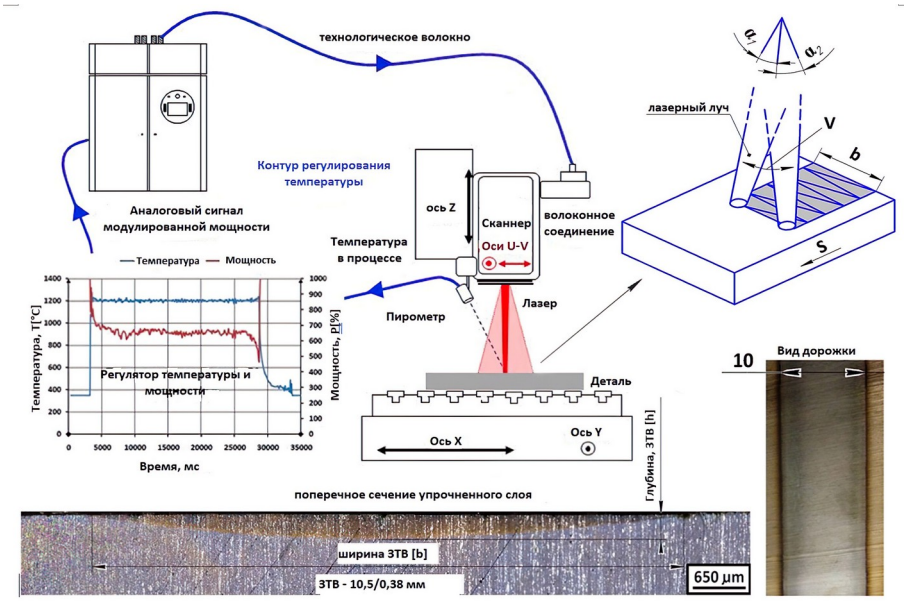

Рисунок 1 - Схема лазерной закалки

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.1

Таблица 1 - Режимы лазерной закалки

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.2

№ режима	Л31-6	Л37	Л38	Л39	Л310	Л3 11	Л312	Л313	Л314	Л315
Параметр	Значение параметров режима									
T, °C	900/1050	1200			1270			1340		
S, мм/мин	40/90/140	40	90	140	40	90	140	40	90	140

Разновидность УЗО – ультразвуковая ударная обработка (УУО) проводилась с частотой колебаний инструмента f = 21,6 кГц, амплитудой колебаний А от 15 мкм до 18 мкм, статической силой прижима $P_{ст}$ = 50 Н, скоростью движения заготовки S = 600 мм/мин. Длительность УУО варьировалась в пределах τ = 60 – 240 сек. В качестве инструмента применялась головка с семью цилиндрическими наконечниками диаметром 5 мм каждый. Схема обработки представлена на рис. 2. Режимы УУО приведены в таблице 2. Полученные результаты эксперимента приведены на рис. 3.

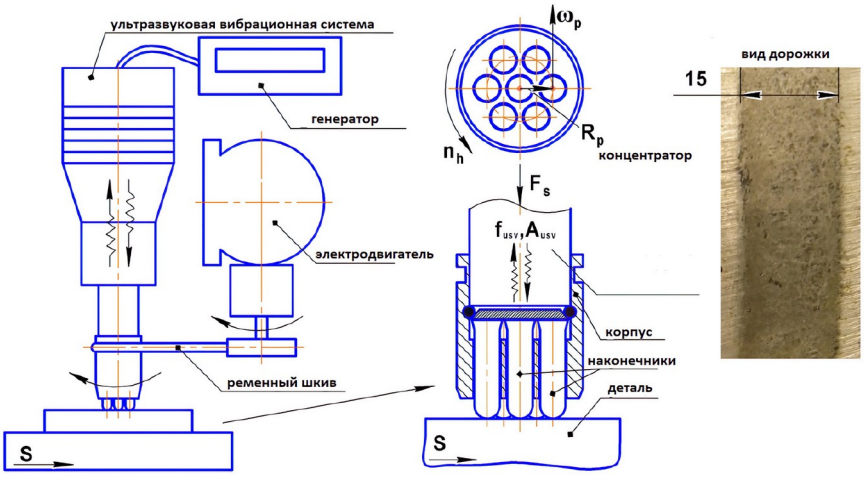

Рисунок 2 - Схема ультразвуковой ударной обработки

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.3

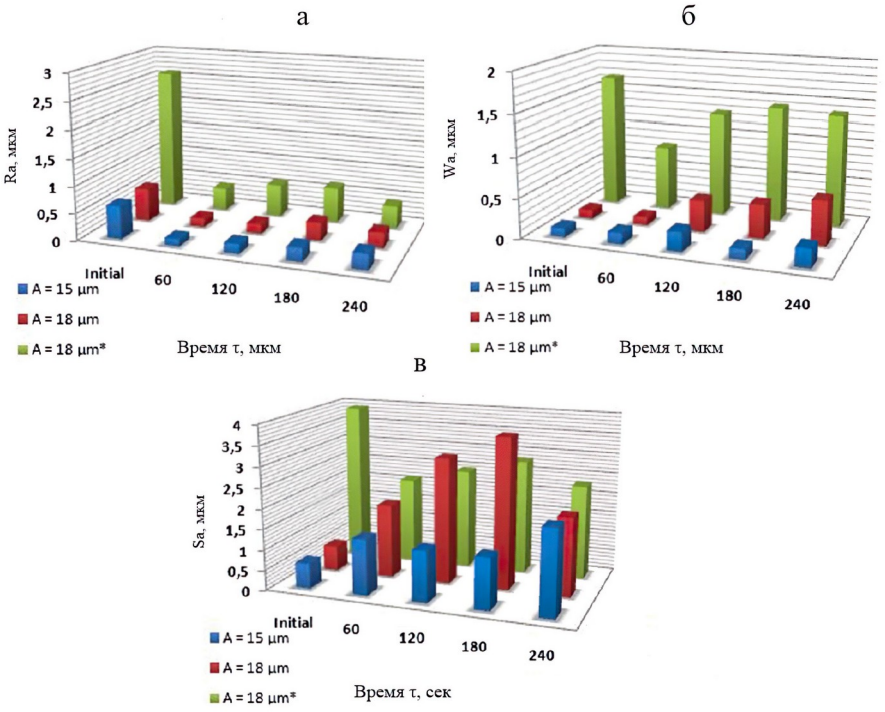

Рисунок 3 - Влияние УУО на изменение параметров микрорельефа:
а – шероховатость поверхности Ra; *б* – волнистость поверхности Wa ; *в* – средняя высота неровностей Sa; * – нешлифованная исходная поверхность
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.4

Таблица 2 - Режимы ультразвуковой ударной обработки

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.5

№ режима	УУО1	УУО2	УУО3	УУО4	УУО5	УУО6	УУО7	УУО8
Параметр	Значение параметров режима							
А, мкм	15				18			
τ, сек	60	120	180	240	60	120	180	240

Сильное пластическое деформирование, вызванное УУО, способствует формированию правильного микрорельефа на обработанной поверхности. По сравнению с исходным состоянием процесс УУО приводит к уменьшению параметра шероховатости Ra (рис. 3, а) и увеличению параметров волнистости поверхности Wa (рис. 3, б) и средней высоты неровностей Sa (рис. 3, в). Наиболее заметное снижение параметра шероховатости (Ra = 0,13 – 0,18 мкм) было зарегистрировано после УУО в течение 60 и 120 с (рис. 3, а). Процесс УУО предварительно шлифованной поверхности (рис. 3, а) позволил снизить параметр шероховатости Ra в 3,5 раза. Но в то же время можно отметить увеличение параметров волнистости Wa (в 3,5 раза) и средней высоты неровностей Sa (в 5 раз) по сравнению с исходным состоянием. И наоборот, нешлифованная поверхность, которая характеризуется гораздо большими исходными параметрами поверхности, претерпевает заметные изменения (рис. 3, а – в, задние столбцы). Все геометрические параметры шероховатости профиля микрорельефа были значительно снижены после процесса УУО, в частности Ra, Wa и Sa были уменьшены в 9,5, 1,8 и 2,3 раза соответственно.

Обобщенные результаты после проведения эксперимента сведены в таблицу 3.

Таблица 3 - Геометрические параметры поверхности после ЛЗ, УУО, ЛЗ+УУО

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.6

Вид обработки	Параметры шероховатости					
	Ra	Отклонение от первоначал	Wa	Отклонение от первоначал	Sa	Отклонение от первоначал

		ьного значения		ьного значения		ьного значения
	мкм	%	мкм	%	мкм	%
исходная заготовка	2,6	-	1,66	-	3,91	-
Л311	2,56	1,5	1,56	6,0	3,83	2,0
УУО6	0,42	83,8	0,8	51,8	2,46	37,0
Л311+УУО 6	0,3	88,5	0,54	67,5	1,98	49,3

Как видно из таблицы, при параметрах, соответствующих режимам Л311 и УУО6, снижение параметра шероховатости Ra относительно первоначального значения достигает 88,5%.

Из-за разницы в скорости обработки авторами работы [1] не было рассмотрено совмещение ЛЗ и УУО в единый технологический процесс обработки, т.к. ЛЗ в отличие от УЗО проводится со скоростью, как правило, на порядок меньше, что требует подборов параметров режимов ЛЗ и УЗО. Хотя, как показывают исследования, ЛЗ вполне может проводиться с большими скоростями обработки.

Результаты исследования влияния на шероховатость поверхности тех или иных сочетаний упрочняющей обработки поверхностей представлены в работе [8]. В данной работе представлены результаты исследований влияния ЛЗ, УУО, сочетаний ЛЗ+УУО (в виде последовательных операций), ЛЗ+УУО (в виде совмещенной операции). Из рис. 4 можно увидеть результаты такой обработки.

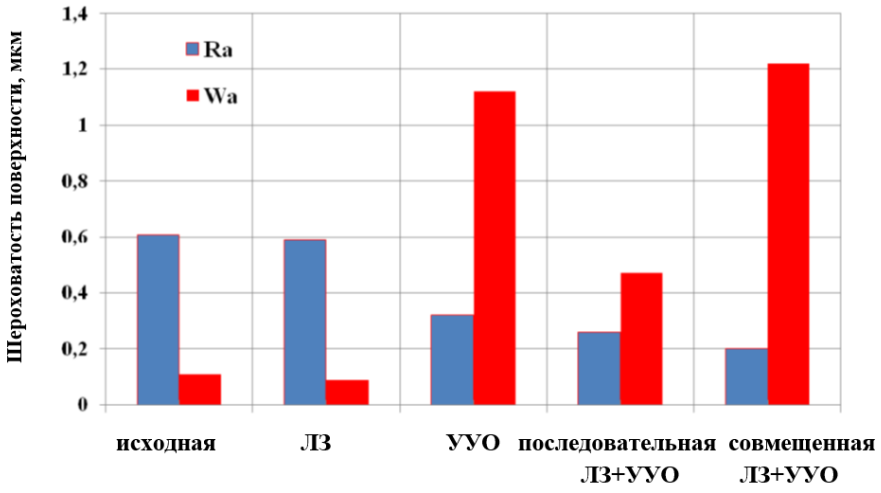

Рисунок 4 - Шероховатость поверхности и длина волны для обработанной стали марки AISI 1045 в исходном состоянии и после ЛЗ, УУО, ЛЗ+УУО (в виде последовательных операций), ЛЗ+УУО (в виде совмещенной операции)
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.7

Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что по сравнению с применяемыми методами поверхностного упрочнения более низкая шероховатость поверхности обработанной поверхности получена после лазерно-ультразвуковой обработки в виде совмещенной операции. Более того, следует отметить, что параметр шероховатости Ra становится меньше после лазерно-ультразвуковой обработки в виде совмещенной операции (Ra ~ 0,2 мкм), чем после совмещенного процесса термодеформационного упрочнения с использованием Nd:YAG лазера и ролика (Ra = 0,5 – 1 мкм) [9]. Таким образом, использование сверхбыстрого лазерного нагрева и охлаждения материалов в сочетании с процессом ППД, осуществленного при помощи ультразвуковой головки с несколькими наконечниками, позволит сформировать поверхность с определенными значениями шероховатости поверхности.

В работе [2] авторами были получены уравнения регрессии, описывающие зависимости параметра шероховатости (Ra), параметра волнистости (Wa), средней высоты неровностей (Sa) от амплитуды колебаний и времени обработки после УУО, а также построены контурные кривые поверхностей равного отклика (формулы 1 – 3 и рис. 5).

$$Ra = 0,35 + 5,55 \cdot 10^{-3}\ A + 6,65 \cdot 10^{-3} t - 1,85 \cdot 10^{-4} At + 1,48 \cdot 10^{-3}\ A^2 - 1,25 \cdot 10^{-5} t^2 \quad (1)$$

$$Wa = 4,08 + 0,28\ A + 0,01t - 7,22 \cdot 10^{-4} At - 2,09 \cdot 10^{-5} t^2 \quad (2)$$

$$Sa = 20,51 - 2,79\ A + 2,08 \cdot 10^{-3} t + 4,44 \cdot 10^{-4} At + 0,09\ A^2 - 2,88 \cdot 10^{-5} t^2 \quad (3)$$

где A – амплитуда колебаний ультразвукового инструмента, мкм;
t – время обработки, с

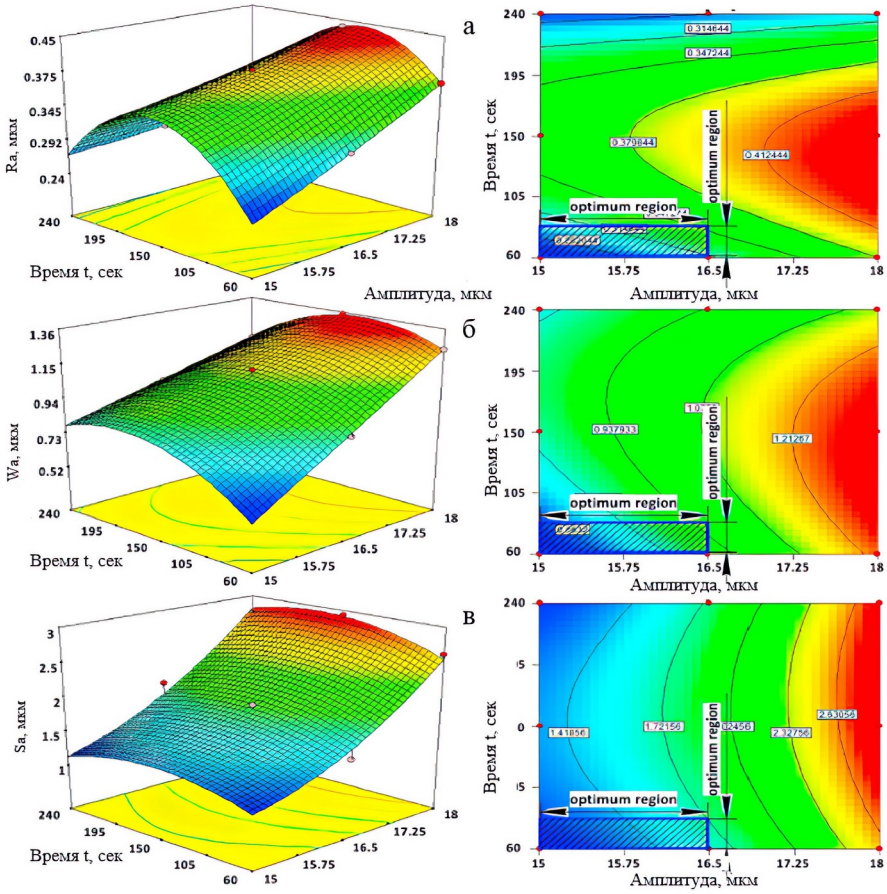

Рисунок 5 - Контурные кривые поверхностей равного отклика для:
а – параметра шероховатости (Ra); *б* – параметра волнистости (Wa); *в* – средней высоты неровностей (Sa) в зависимости от амплитуды колебаний и времени обработки после УУО
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.8

Внешний вид полученных поверхностей и их проекций в виде контурных кривых позволяет утверждать, что снижение амплитуды колебаний и времени обработки приводит к снижению значений Ra, Wa, Sa после УУО.

В то же время, полученные уравнения регрессии позволяют подобрать оптимальные параметры режима УУО, проводимой после ЛЗ для достижения заданной шероховатости поверхности.

Однако авторами работ [1], [2], [8] не было оценено как влияют на шероховатость обработанной поверхности статическая сила прижима инструмента и скорость движения заготовки при УУО.

Результаты исследований влияния параметров режима комбинированной лазерно-ультразвуковой обработки на твердость поверхности и глубину упрочненного слоя приведены в работах [2], [10].

Влияние скорости обработки на твердость приведено на рис. 6 [10].

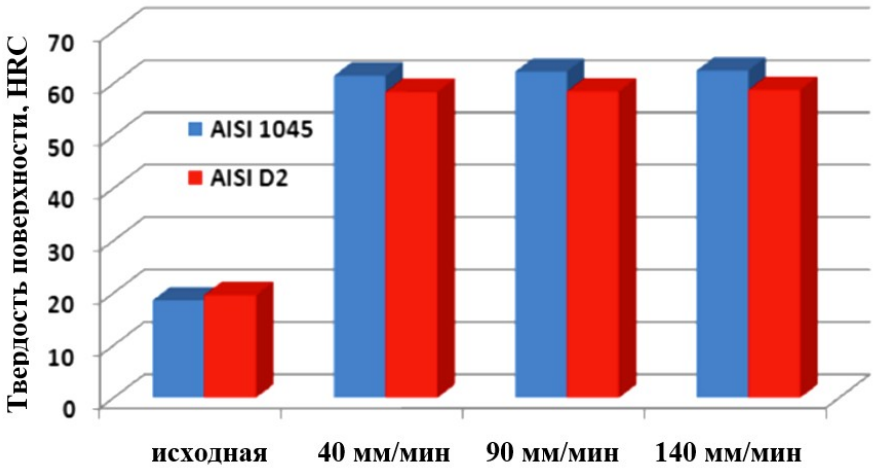

Рисунок 6 - Влияние скорости обработки на твердость поверхности после УУО
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.9

Как видно из рис. 6 значение твердости после УУО, осуществленной на разных скоростях, выросло более чем в 3 раза по сравнению с исходным состоянием. При этом не наблюдается особого влияния скорости обработки на значение твердости после УУО.

В работе [2] авторы получили уравнения регрессии, описывающие зависимость твердости поверхности от температуры закалки и скорости обработки (формула 4); от амплитуды колебаний и времени обработки после последующей УУО (формула 5), а также построены контурные кривые поверхностей равного отклика (рис. 7).

$$HRC_{ЛЗ} = 256,7 + 0,48\ T + 0,16\ S - 5,73 \cdot 10^{-5} TS - 1,92 \cdot 10^{-4}\ T^2 - 3,26 \cdot 10^{-4}\ S^2 \quad (4)$$

$$HRC_{УУО} = 32,24 - 0,42\ A - 0,05t + 1,48 \cdot 10^{-3} At + 0,01\ A^2 + 8,43 \cdot 10^{-5} t^2 \quad (5)$$

где T – температура закалки, °C,
S – скорость обработки, мм/мин,
A – амплитуда колебаний ультразвукового инструмента, мкм,
t – время обработки, сек.

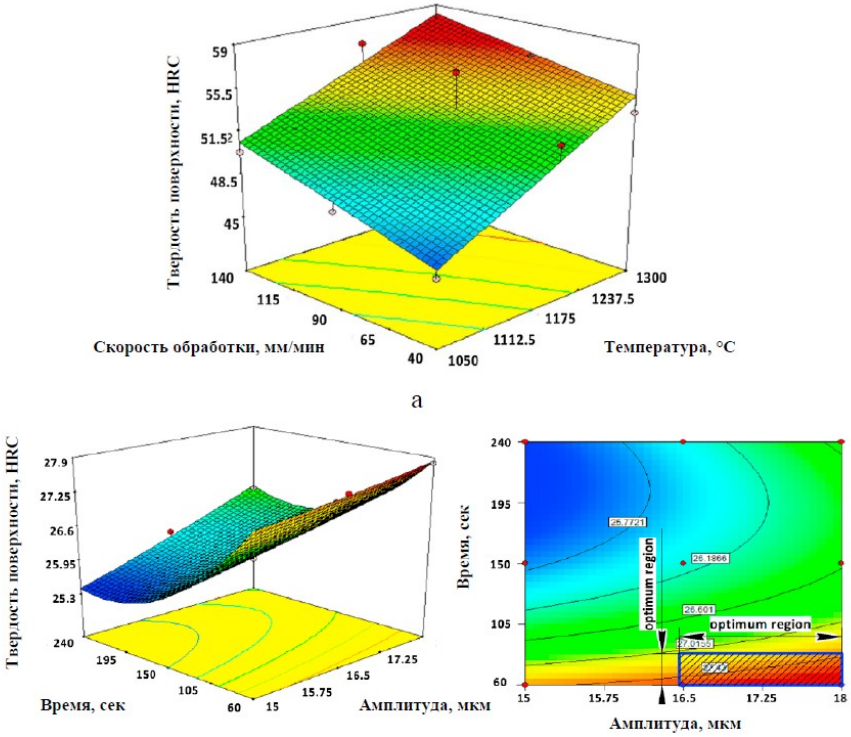

Рисунок 7 - Контурные кривые поверхностей равного отклика для твёрдости в зависимости:
а – от температуры и скорости обработки после ЛЗ; *б* – от амплитуды колебаний и времени обработки после последующей УУО

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.10

Как видно из рис. 7 высокие значения твердости после ЛЗ обеспечиваются при более высоких температурах и скорости обработки, в тоже время увеличение амплитуды колебаний после УУО также способствует повышению твердости обработанной поверхности. При этом увеличение времени обработки дает обратный эффект.

В работе [8] показаны очевидные плюсы совмещенной в одну операцию ЛЗ+УУО (рис. 8).

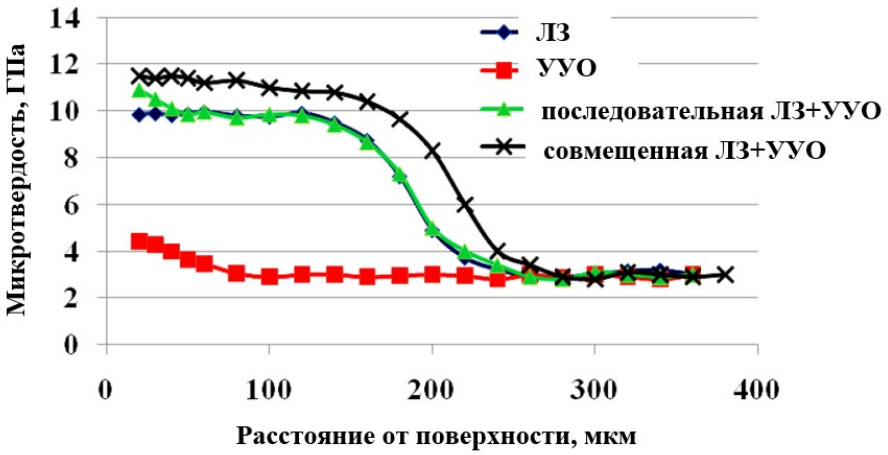

Рисунок 8 - Глубина упрочненного слоя для стали AISI 1045 обработанной различными способами
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.11

Как видно из рис. 8 глубина упрочненного слоя после совмещенной ЛЗ+УУО выше, чем при ЛЗ и последовательной УУО+ЛЗ. Таким образом, сам характер обработки оказывает определенно положительное влияние на твердость поверхности и глубину упрочненного слоя.

Возвращаясь к работе [1], можно оценить знак, величину и глубину остаточных напряжений (рис. 9). Глубина сжатых областей, образованных ЛЗ, составляет около 350 мкм, что намного больше, чем глубина, вызванная сильным деформированием в процессе УУО (приблизительно 100 мкм). В обоих случаях на больших глубинах остаточные напряжения сжатия уравновешиваются остаточными напряжениями растяжения. Профиль глубины остаточных напряжений, сформированный после комбинированного процесса ЛЗ+УУО, является более сложным – он колеблется на глубине примерно 50 – 60 мкм.

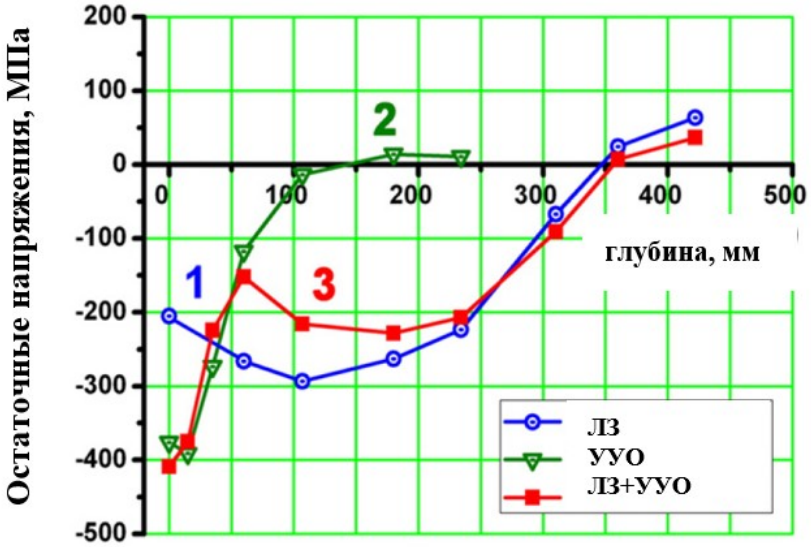

Рисунок 9 - Остаточные напряжения, сформированные после ЛЗ, УУО, ЛЗ+УУО для инструментальной стали марки AISI D2
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.12

Износостойкость и сила трения рассмотрены в работах [11], [12].

Экспериментально зарегистрированные потери на износ после квазистатических и динамических испытаний, продолжавшихся 15 и 45 мин, приведены на рис. 10.

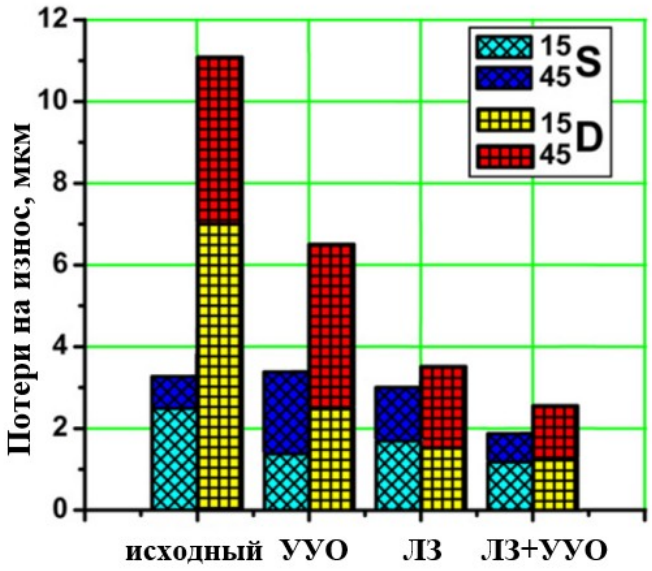

Рисунок 10 - Потери на износ исходного образца из инструментальной стали AISI D2 и образцов после ЛЗ, УУО, ЛЗ+УУО, зарегистрированные в квазистатических (S) и динамических (D) условиях испытаний
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.13

В целом результаты испытаний на износ обоих типов демонстрируют, что все используемые виды упрочняющей обработки приводят к уменьшению потерь на износ по сравнению с исходным состоянием. Это наблюдение хорошо коррелирует с поведением твердости. Самые низкие величины потерь на износ были зарегистрированы после комбинированного процесса ЛЗ+УУО. Измеренные в квазистатических и динамических испытаниях, они, соответственно, в 2 и 4 раза ниже, чем у исходных образцов. При динамическом испытании величины потерь на износ, естественно выше, чем после квазистатического испытания, из-за дополнительной импульсной составляющей нагрузки, приложенной к индентору во время испытаний. При этом динамически испытываемая величина потерь на износ для образца, обработанного ЛЗ+УУО, ниже, чем у исходного образца, испытанного в квазистатических условиях, и в четыре раза ниже, чем у динамически испытываемого исходного образца.

Также интересно изменение силы трения образцов после соответствующих сочетаний комбинированной обработки (рис. 11).

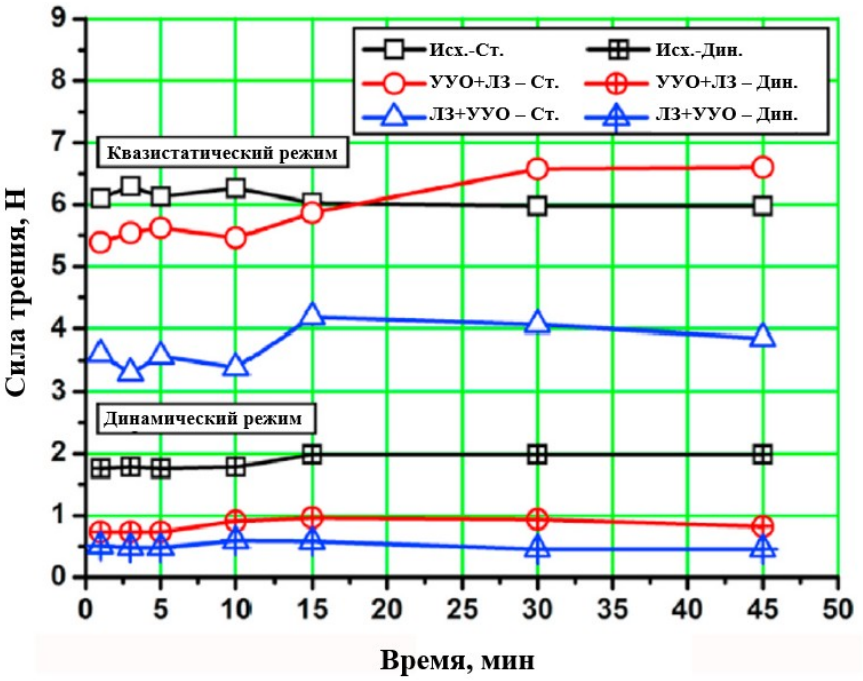

Рисунок 11 - Зависимость силы трения от времени после проведенных испытаний на износ, выполненных в квазистатических (Ст.) и динамических (Дин.) условиях для исходных образцов из стали AISI 1045, обработанных УУО и комбинированных УУО+ЛЗ и ЛЗ+УУО
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.14

Из рис. 11 видно, что при испытаниях на динамический износ сила трения значительно ниже, чем при квазистатических испытаниях. Для обоих условий испытаний на износ стадия приработки (до 15 мин) характеризуется видимыми колебаниями сил трения, которые связаны с изменениями состояния поверхности и включением механизмов износа. Значения силы терния для образцов, подвергнутых ЛЗ+УУО, являются самыми низкими для обоих условий испытания, что коррелирует с их износостойкостью [9]. Значения силы трения для исходного образца, испытанного в квазистатическом и динамическом режимах, в два раза выше, чем те, которые зарегистрированы для образцов, обработанных ЛЗ+УУО. Другая последовательность комбинированного процесса УУО+ЛЗ оказывается менее эффективной, особенно при испытаниях на квазистатический износ.

Заключение

Параметры режима лазерно-ультразвуковой упрочняющей обработки оказывают значительное влияние на состояние поверхности и поверхностного слоя после данного вида упрочняющей обработки. В значительной степени на качество поверхности и поверхностного слоя оказывают влияние параметры режима ультразвуковой обработки – как окончательного вида обработки после лазерной закалки.

Так, для получения минимальных знаний шероховатости необходимо:

- проводить лазерную закалку на режимах, обеспечивающих шероховатость поверхности не хуже, чем у исходной заготовки;
- ультразвуковую обработку вести на режимах с меньшей амплитудой колебаний ультразвукового инструмента и временем проработки поверхности;
- по возможности проводить совмещение лазерной закалки и ультразвуковой обработки в одну операцию.

Для повышения твердости и глубины упрочненного слоя необходимо:

- проводить лазерную закалку с большими скоростями обработки и температурой нагрева поверхности, избегая при этом ее оплавления;
- ультразвуковую обработку вести при повышенных значениях амплитуды колебания ультразвукового инструмента (при этом стараясь не приводить к ухудшению шероховатости поверхности) и меньших значениях времени проработки обрабатываемой поверхности;
- по возможности проводить совмещение лазерной закалки и ультразвуковой обработки в одну операцию, что способствует увеличению глубины упрочненного слоя.

Повышение износостойкости, формирование значительных величин напряжений сжатия в поверхностном слое, снижение силы трения связано в первую очередь с самим характером упрочняющей обработки.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Царегородцев Е.Л., Национальный исследовательский университет МЭИ, филиал в г. Смоленск, Смоленск, Российская Федерация

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.15

Conflict of Interest

None declared.

Review

Tsaregorodtsev Y.L., National Research University of MEI, branch in Smolensk, Smolensk, Russian Federation

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.97.15

Список литературы / References

1. Lesyk D.A. Surface Microrelief and Hardness of Laser Hardened and Ultrasonically Peened AISI D2 Tool Steel. / D.A. Lesyk, S. Martinez, V.V. Dzhemelinskyy et al. // Surface and Coatings Technology. — 2015. — 278. — p. 108-120. — DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.07.049
2. Lesyk D.A. Effects of Laser Heat Treatment Combined with Ultrasonic Impact Treatment on the Surface Topography and Hardness of Carbon Steel AISI 1045. / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk et al. // Optics & Laser Technology. — 2019. — 111. — p. 424-438. — DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.09.030
3. Синдеев В.И. Исследование влияния упрочняюще-чистовой обработки лучом лазера и ультразвуковым инструментом на качество поверхностного слоя стальных деталей дис. ...канд.: 05.02.08 / В.И. Синдеев — Новосибирск: 2023. — 222 с.
4. Гуреев Г.Д. Лазерное и лазерно-ультразвуковое упрочнение поверхности металлических пластин. / Г.Д. Гуреев, Д.М. Гуреев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». — 2005. — 34. — с. 90-94.
5. Бровер А.В. Структурное состояние поверхностных слоев стали Х12М после лазерно-акустической обработки. / А.В. Бровер // Вестник машиностроения. — 2008. — 11. — с. 67-69.
6. Dzhemelinskiy V.V. Use of Laser-ultrasonic Technology for Finishing-strengthening Processes / V.V. Dzhemelinskiy, G.I. Prokopenko, D. Lesyk // Materials of Fifth Int. Conf.: Laser Technologies in Welding and Materials Processing; — Katsiveli, 2011. — p. 24-27.
7. Джемелінський В.В. Визначення оптимальних параметрів лазерно-ультразвукового зміцнення та оздоблювання поверхонь виробів / В.В. Джемелінський, Д.А. Лесик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: машинобудування. — 2013. — 2(68). — с. 15-18.
8. Dzhemelinskyi V. Surface Hardening and Finishing of Metal Products by Hybrid Laser-ultrasonic Treatment. / V. Dzhemelinskyi, D. Lesyk, O. Goncharuk et al. // Materials and Science. — 2018. — 12(91). — p. 35-42.
9. Tian Y. Laser-assisted Burnishing of Metals. / Y. Tian, Y. Shin // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2007. — 47. — p. 14-22.

10. Lesyk D. Combined Laser-Ultrasonic Surface Hardening Process for Improving the Properties of Metallic Products. / D. Lesyk, S. Martinez, D. Mordyuk et al. // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. — 2018. — 1.

11. Lesyk D.A. Microstructure Related Enhancement in Wear Resistance of Tool Steel AISI D2 by Applying Laser Heat Treatment Followed by Ultrasonic Impact Treatment. / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk et al. // Surface and Coatings Technology. — 2017. — 328. — p. 344-354. — DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.08.045

12. Lesyk D.A. Combining Laser Transformation Hardening and Ultrasonic Impact Strain Hardening for Enhanced Wear Resistance of AISI 1045 steel / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk et al. // Wear. — 2020. — p. 462-463. — DOI: 10.1016/j.wear.2020.203494

Список литературы на английском языке / References in English

1. Lesyk D.A. Surface Microrelief and Hardness of Laser Hardened and Ultrasonically Peened AISI D2 Tool Steel. / D.A. Lesyk, S. Martinez, V.V. Dzhemelinskyy et al. // Surface and Coatings Technology. — 2015. — 278. — p. 108-120. — DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.07.049

2. Lesyk D.A. Effects of Laser Heat Treatment Combined with Ultrasonic Impact Treatment on the Surface Topography and Hardness of Carbon Steel AISI 1045. / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk et al. // Optics & Laser Technology. — 2019. — 111. — p. 424-438. — DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.09.030

3. Sindeev V.I. Issledovanie vliyaniya uprochnyayushche-chistovoi obrabotki luchom lazera i ultrazvukovim instrumentom na kachestvo poverkhnostnogo sloya stalnikh detalei [Investigation of the Effect of Hardening and Finishing Treatment with a Laser Beam and an Ultrasonic Tool on the Quality of the Surface Layer of Steel Parts] dis....of PhD: 05.02.08 / V.I. Sindeev — Novosibirsk: 2023. — 222 p. [in Russian]

4. Gureev G.D. Lazernoe i lazerno-ul'trazvukovoe uprochnenie poverxnosti metallicheskix plastin [Laser and Laser-ultrasonic Surface Hardening of Metal Plates]. / G.D. Gureev, D.M. Gureev // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Seriya «Fiziko-matematicheskie nauki» [Bulletin of Samara State Technical University. Series "Physical and Mathematical Sciences"]. — 2005. — 34. — p. 90-94. [in Russian]

5. Brover A.V. Strukturnoe sostoyanie poverxnostny'x sloev stali X12M posle lazerno-akusticheskoj obrabotki [Structural State of Surface Layers of Steel X12M after Laser Acoustic Treatment]. / A.V. Brover // Vestnik mashinostroeniya [Russian Engineering Research]. — 2008. — 11. — p. 67-69. [in Russian]

6. Dzhemelinskiy V.V. Use of Laser-ultrasonic Technology for Finishing-strengthening Processes / V.V. Dzhemelinskiy, G.I. Prokopenko, D. Lesyk // Materials of Fifth Int. Conf.: Laser Technologies in Welding and Materials Processing; — Katsiveli, 2011. — p. 24-27.

7. Dzhemelinskiy V.V. Viznachennya optimal'nih parametriv lazerno-ul'trazvukovogo zmicnennya ta ozdoblyuvannya poverhon' virobiv [Determining the Optimal Parameters of Laser Ultrasonic Hardening and Finishing of the Surface Products] / V.V. Dzhemelinskiy, D.A. Lesyk //Visnik NTUU «KPI». Seriya mashinobuduvannya [Bulletin of NTUU “KPI”, Series: Machine Building. 2013. — 2(68). — p. 15-18. [in Ukrainian]

8. Dzhemelinskyi V. Surface Hardening and Finishing of Metal Products by Hybrid Laser-ultrasonic Treatment. / V. Dzhemelinskyi, D. Lesyk, O. Goncharuk et al. // Materials and Science. — 2018. — 12(91). — p. 35-42.

9. Tian Y. Laser-assisted Burnishing of Metals. / Y. Tian, Y. Shin // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2007. — 47. — p. 14-22.

10. Lesyk D. Combined Laser-Ultrasonic Surface Hardening Process for Improving the Properties of Metallic Products. / D. Lesyk, S. Martinez, D. Mordyuk et al. // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. — 2018. — 1.

11. Lesyk D.A. Microstructure Related Enhancement in Wear Resistance of Tool Steel AISI D2 by Applying Laser Heat Treatment Followed by Ultrasonic Impact Treatment. / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk et al. // Surface and Coatings Technology. — 2017. — 328. — p. 344-354. — DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.08.045

12. Lesyk D.A. Combining Laser Transformation Hardening and Ultrasonic Impact Strain Hardening for Enhanced Wear Resistance of AISI 1045 steel / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk et al. // Wear. — 2020. — p. 462-463. — DOI: 10.1016/j.wear.2020.203494