

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-84-92

УДК 621.9.048.6

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ  
УПРОЧНЯЮЩЕ-ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ  
С ТОНКОСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ****TECHNOLOGICAL MODES FOR ULTRASONIC SURFACE HARDENING  
OF PARTS WITH THIN-LAYER COATINGS****Рахимьянов Андрей Харисович,**кандидат техн. наук, доцент, e-mail: [a.rakhimyanov@corp.nstu.ru](mailto:a.rakhimyanov@corp.nstu.ru)  
**Andrei Kh. Rakhimyanov, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,****Семенова Юлия Станиславовна,**кандидат техн. наук, доцент, e-mail: [yu.semenova@corp.nstu.ru](mailto:yu.semenova@corp.nstu.ru)  
**Yulia S. Semenova, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,****Живага Анастасия Александровна,**магистрант, e-mail: [nastya-zhivaga@yandex.ru](mailto:nastya-zhivaga@yandex.ru)  
**Anastasia A. Zhivaga, graduate student,**

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск,  
пр. К. Маркса, 20  
Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073,  
Russian Federation.

**Аннотация:** Нанесение тонкослойных функциональных покрытий требует особого подхода к окончательной обработке поверхностей. Для обеспечения сохранения свойств нанесенного покрытия необходимо обеспечивать такое воздействие на материал покрытия, чтобы сохранить его целостность и функциональность. В данной работе представлены перспективы применения ультразвукового пластического деформирования в качестве упрочняюще-чистовой финишной обработки изделий с тонкослойными покрытиями. В рамках проведенных исследований были выявлены ограничения по назначению технологических режимов обработки, связанных как с возможностями оборудования, так и с необходимостью обеспечения требуемых свойств поверхности и поверхностного слоя. Определены характеристики применяемого оборудования, определяющие режимные параметры обработки. Для данных режимов представлены зависимости диаметра единичного отпечатка инструмента от статического усилияжатия инструмента к детали. На основании расчета диаметра отпечатка установлены условия получения регулярного микрорельефа, формируемого на обрабатываемой поверхности за счет перекрытия этих отпечатков при взаимном перемещении инструмента и обрабатываемой поверхности. Определены диапазоны значений режимных параметров ультразвукового пластического деформирования цилиндрических деталей из закаленной и незакаленной стали 45, обеспечивающих формирование регулярного микрорельефа на обработанной поверхности.

**Abstract:** The application of thin-layer functional coatings requires a special approach to the final surface processing. To ensure keeping of the coating properties, it is necessary to provide such an effect on the coating material that will allow the maintaining of its integrity and functionality. In this paper, the prospects of using ultrasonic surface hardening as a hardening-finishing processing of products with thin-layer coatings are presented. Within the framework of the studies conducted, limitations on the designation of technological mode were revealed. These limitations related both to the capabilities of the equipment and the need to ensure the required surface and surface layer properties. The characteristics of the equipment, that determine the processing parameters, are identified. For these parameters, the dependencies of the diameter of a single tool imprint on the static force of pressing the tool to the part are shown. The conditions for obtaining a regular microrelief formed on the surface to be treated are established based on the calculation of the imprint diameter. The regular microrelief is formed by overlapping these imprints when the tool and the surface being processed moved reciprocally. The ranges of values of the mode parameters of ultrasonic plastic deformation of cylindrical parts made of hardened and non-hardened steel 45, providing the formation of a regular microrelief on the processed surface, are determined.

**Ключевые слова:** ультразвуковое пластическое деформирование, регулярный микрорельеф, покрытие, режимы обработки.

**Key words:** ultrasonic plastic deformation, microhardness, microrelief, cementation, mathematical planning.

### Введение

С помощью современных методов нанесения покрытий формируются слои толщиной от десятков миллиметров до нескольких десятков микрометров [1-4]. При этом важную роль будет играть топография поверхности детали с покрытием, т.к. эксплуатационные свойства рабочих поверхностей определяются степенью развитости поверхности, отвечающей за площадь контакта поверхности с окружающей средой [5], а также характером распределения элементов рельефа по поверхности [6, 7].

Одним из перспективных методов финишной обработки, направленным на формирование развитого регулярного микрорельефа, является ультразвуковое пластическое деформирование (УЗПД) – метод упрочняюще-отделочной обработки, при котором обрабатываемая поверхность детали подвергается ударному воздействию деформирующего инструмента, колеблющегося с частотой свыше 18 кГц [8-10]. За счет дискретного контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью формируются отдельные отпечатки, упорядоченное расположение которых образует на обрабатываемой поверхности регулярный микрорельеф [11-14].

В работах [15-16] представлены зависимости параметров микрорельефа от сочетания режимных параметров обработки при УЗПД. Данные зависимости могут быть использованы при назначении режимов обработки тонкослойных покрытий. В

данном случае важно, чтобы деформационное воздействие, оказываемое на поверхностный слой, не повлияло на адгезионные свойства покрытия и не ухудшило условия его контактирования с основным материалом. Поэтому при обработке тонкослойных покрытий следует применять такие режимы, чтобы глубина деформированного слоя не превышала толщину покрытия.

В связи с этим целью данной работы является выявление ограничений при назначении режимов ультразвуковой обработки тонкослойных покрытий, при этом обеспечивающих упрочняющий эффект и формирование регулярного рельефа на поверхности.

### Выявление технологических ограничений

Назначение щадящих режимов ультразвуковой обработки заключается в снижении деформационного воздействия на поверхностный слой. Таким образом, следует назначать низкие значения статического усилия, частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний. При этом необходимо учитывать технологические возможности реального оборудования. Так, для имеющейся установки значением частоты колебаний управлять не возможно, поскольку она фиксирована. Изменение амплитуды колебаний возможно осуществить за счет конструктивных изменений волновода и регулировкой мощности генератора. Наиболее простым в управлении режимом является регулировка статического усилия, т.к. она осуществляет-

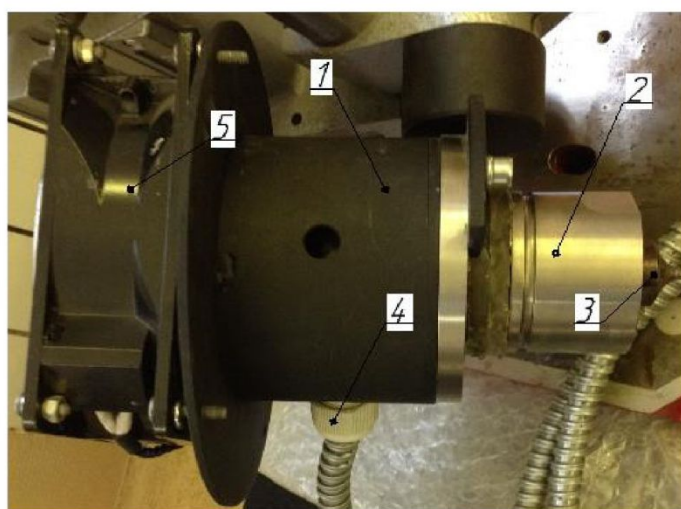


Рис.1. Внешний вид пьезокерамического преобразователя

1 – корпус преобразователя; 2 – волновод; 3 – деформатор; 4 – кабель напряжения; 5 – вентилятор

Fig.1. The piezoceramic transducer. 1 - converter chassis; 2 - waveguide; 3 - deformer; 4 - the voltage cable; 5 - fan



ся сменой груза заданной массы.

В лаборатории ультразвуковых технологий кафедры технологии машиностроения для ультразвукового поверхностного пластического деформирования используется установка, описанная в работе [17]. Установка закреплена на суппорте токарно-винторезного станка 1А616 и состоит из магнитострикционного преобразователя, сменного волновода – концентратора, закрепленных на шариковых направляющих на суппорте станка. В это же работе представлены режимные параметры, с которыми можно производить обработку на данной установке. Величина амплитуды колебаний инструмента при ее использовании составляет 20-100 мкм. Такие значения говорят о высокоинтенсивном динамическом воздействии на поверхностный слой, подвергаемый деформированию. В случае обработки тонкослойных покрытий следует выбирать амплитуды меньших значений. Поэтому было принято решение заменить магнитострикционный преобразователь пьезокерамическим, работающим в диапазоне меньших амплитуд. В комплекте с пьезокерамическим преобразователем используется ультразвуковой генератор фирмы «Ультразвуковая техника - Инлаб» ИЛ 10-0,1 (рис.1). Технические характеристики генератора, указанные в паспорте: выходная мощность, не менее 400Вт, до 1000 Вт, потребляемая мощность, не менее 500 Вт; ступенчатая регулировка мощности, в процентах от номинальной: 100%; 75%; 50% Частота колебаний генератора и амплитуда колебаний на выходе преобразователя не указаны, поэтому были произведены соответствующие замеры.

В качестве устройства для измерения частоты колебаний пьезоэлектрического преобразователя использовался электронносчетный частотомер ЧЗ-34А, предназначенный для измерения частоты

С целью предотвращения возникновения замыкания пьезокерамического преобразователя в процессе измерения частоты колебаний, связанного с большим входным напряжением, был спаян делитель сопротивления. Схема делителя представлена на рис. 3. Делитель напрямую подсоединялся к электродам, расположенным на пьезокерамических дисках. Входной шнур подключался одним концом напрямую к частотомеру, другим подсоединялся к делителю. Настройка осуществлялась при выключенном частотомере. Внешний вид всей установки для экспериментального измерения частоты ультразвуковых колебаний представлен на рис. 4.

Измерения частоты ультразвуковых колебаний пьезоэлектрического преобразователя проводились на всех трех уровнях мощности ультразвукового генератора. Произведенные измерения показали, что частота ультразвуковых колебаний при минимальном уровне мощности генератора составила –  $f_{\min} = 16,2$  кГц, при среднем уровне –  $f_{\text{mid}} = 19,6$  кГц и при максимальном –  $f_{\max} = 20,7$  кГц. В дальнейших расчетах для их упрощения за рабочую частоту ультразвуковых колебаний пьезоэлектрического преобразователя принимаем значение частоты –  $f = 20$  кГц

Измерение амплитуды ультразвуковых колебаний преобразователя производилось с помощью отсчетного спирального микроскопа ОМС. Микроскоп устанавливался на неподвижное основание колебательной системы. Настройка прибора осуществлялась при выключенном генераторе ультразвуковых частот колебаний. Фокус прибора настраивался на яркую выделяющуюся точку на измеряемой поверхности торца волновода преобразователя. При включении генератора за счет колебаний точка размывалась в линию, длина которой соответствовала значению амплитуды ульт-



Рис. 2. Внешний вид частотомера ЧЗ-34А

Fig.1. The frequency meter ЧЗ-34А

синоидальных и импульсных сигналов. Внешний вид частотомера представлен на рисунке 2, основные характеристики приведены в таблице 1.

тразвуковых колебаний. Таким образом, за величину амплитуды принималось значение длины размытой линии, образуемой в результате быстро-

го смещения яркой точки на поверхности, колеблющейся с ультразвуковой частотой. Внешний вид всей установки для экспериментального измерения амплитуды ультразвуковых колебаний пьезокерамического преобразователя представлен на рис. 5.

Измерения показали, что амплитуда ультразвуковых колебаний в зависимости от мощности генератора изменяется в диапазоне от 2 до 5 мкм.

При этом на режиме 50% мощности результаты нестабильны: колебания выходят из диапазона резонансной частоты, величина амплитуды практически равна размерам светящейся точки и трудно измерима. Поэтому для дальнейших расчетов и экспериментов будут использоваться режим 75% и 100% мощности.

Ограничения режимных параметров, обеспечивающих формирование регулярного микрорель-

Таблица 1 - Основные характеристики Частотомера ЧЗ-34А  
Table 1 - The main characteristics of the frequency meter ЧЗ-34А

Основные характеристики	Значение
Диапазон измерения частот синусоидальных сигналов	10 Гц – 120 МГц
Диапазон измерения частот импульсных сигналов	10 Гц – 5 МГц
Напряжение входного синусоидального сигнала	0,1 – 100 В
Напряжение входного импульсного сигнала	0,3 – 100 В
Входное сопротивление	10, кОм (Вход А) 5, кОм (Вход В и Г) 50 Ом (Вход Б)
Выдаваемые частоты синусоидального сигнала	0,1 Гц – 100 МГц
Время одного измерения	1 мс – 10 сек
Напряжение питания	220 В
Габаритные размеры частотомера	480x120x475 мм



Рис. 3. Схема делителя сопротивлений  
Fig. 3. The circuit divider resistors

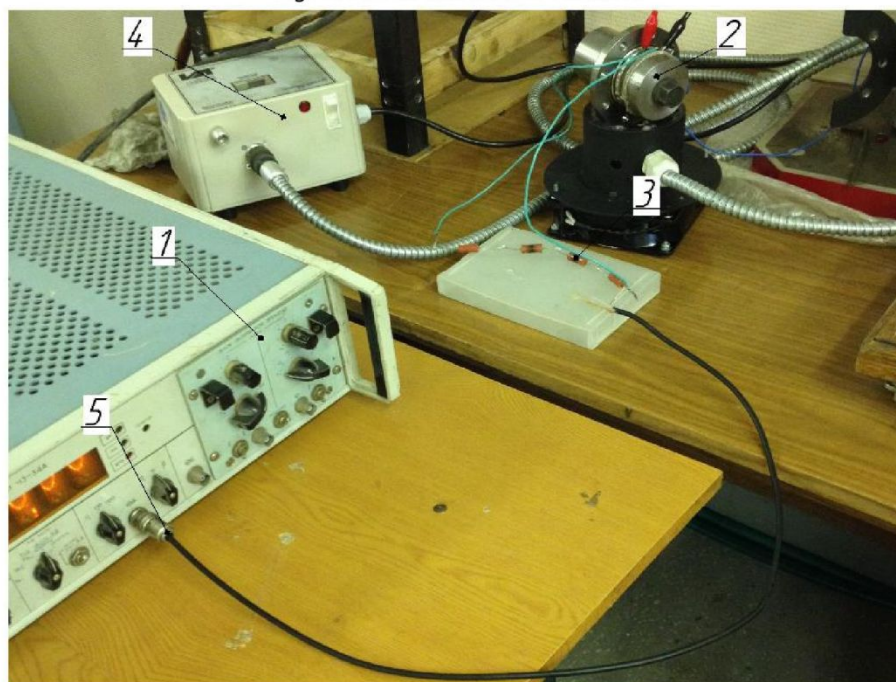


Рис. 4. Внешний вид установки для измерения частоты ультразвуковых колебаний:  
1 – частотомер; 2 – пьезокерамический преобразователь; 3 – делитель сопротивлений; 4 – ультразвуковой генератор; 5 – входной шнур

Fig. 4. The installation for measuring the frequency of ultrasonic vibrations:  
1 - frequency meter; 2 - piezoceramic transducer; 3 - circuit divider; 4 - ultrasonic generator; 5 - input cord



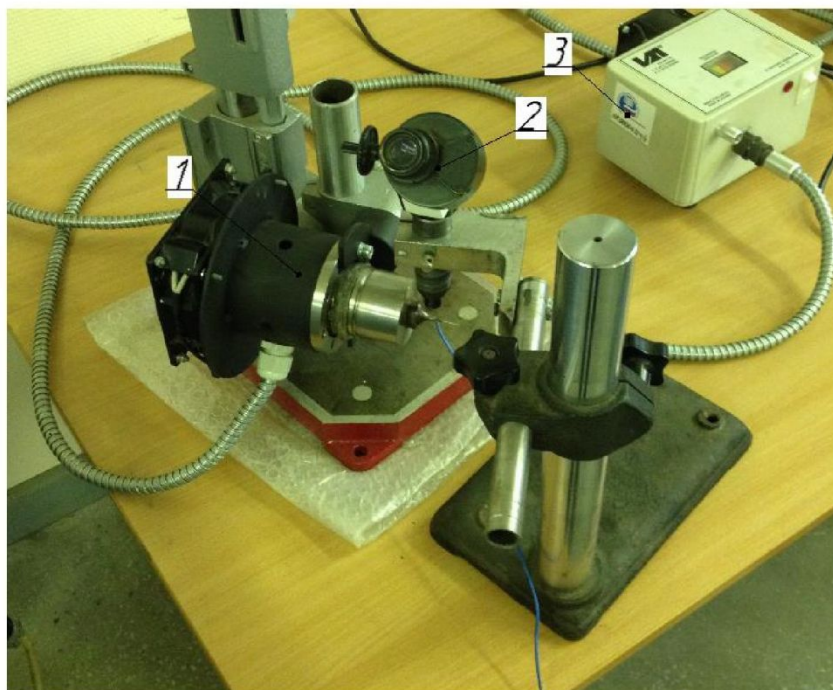


Рис.5. Внешний вид установки для измерения амплитуды ультразвуковых колебаний: 1 – пьезоэлектрический преобразователь; 2 – микроскоп ОМС; 3 – ультразвуковой генератор

Fig.5. The installation for measuring the amplitude of ultrasonic vibrations: 1 - piezoelectric transducer; 2 - OMS microscope; 3 - ultrasonic generator

ефа, вызваны с одной стороны технологическими возможностями установки, а с другой – необходимостью обеспечивать отрыв ультразвукового инструмента от поверхности в процессе обработки.

Для выявления технологических ограничений режимов обработки, обеспечивающих, использовалась модель формирования регулярного микрорельефа поверхности при УЗПД, описанная в работах [15, 16].

В качестве модельного материала выбрана Сталь 45 в закаленном состоянии и в состоянии поставки. Соответствующие характеристики материалов, а также параметры установки, используемые в модели в качестве исходных данных, представлены в таблице 1.

В результате моделирования процесса обработки определяются параметры пластического отпечатка (глубина, диаметр), силовые параметры (максимально действующее усилие в момент времени и статическое усилие), а также значения моментов времени, углов колебаний и промежуточных перемещений деформатора.

График, представленный на рис. 6, показывает зависимость диаметров отпечатков  $d_{отр}$  от статического усилия  $F_{ст}$  для конструкционной стали 45 в закаленном и незакаленном состоянии.

Деформационные параметры определяют геометрию отпечатка деформирующего инструмента. По результатам моделирования можно сделать вывод, что с возрастанием статического усилия, прикладываемого к индентору, увеличивается

диаметр отпечатка. Наибольшее статическое усилие, при котором будут формироваться отдельные отпечатки инструмента на обрабатываемой поверхности ограничивается условием отрыва инструмента от поверхности. Для незакаленной стали 45 при заданных условиях величина усилия составляет –  $F_{ст} = 122$  Н, для закаленной стали –  $F_{ст} = 138$  Н. При этом диаметры отпечатков будут соответственно равны  $d_{отр(незакал)} = 420$  мкм и  $d_{отр(закал)} = 415$  мкм. Минимальное усилие, при котором обеспечивается формирование полностью нового регулярного микрорельефа на поверхности детали, составляет –  $F_{ст} = 50$  Н, при диаметре отпечатка  $d_{отр} = 330$  мкм для незакаленной стали 45, и  $F_{ст} = 53,5$  Н и  $d_{отр} = 310$  мкм для закаленной стали. Это ограничение возникло из-за инерционности системы нагружения имеющейся установки.

Таким образом, назначение кинематических параметров сводится к ограничению максимально возможного расстояния между соседними отпечатками в направлении V и S. Если допустить эти расстояния приблизительно равными и не учитывать смещение соседних отпечатков друг относительно друга на соседних витках, то можно составить систему неравенств:

$$\begin{cases} d_{omn} \geq S\sqrt{2} \\ d_{omn} \geq l_v\sqrt{2} \end{cases} \quad (1)$$

При этом значение скорости вращения детали будет определяться по формуле:

Таблица 2 - Характеристики материала образцов  
 Table 2 - Characteristics of sample material

Параметр	Значение	
	Сталь 45 (сост. поставки)	Сталь 45 (закаленная)
Частота колебаний ультразвукового инструмента ( $f$ ), Гц	20000	
Диаметр деформирующего инструмента, м	0,008	
Скорость звука в материале, м/с	5100	
Площадь поперечного сечения волновода, м <sup>2</sup>	0,000225	
Твердость обрабатываемого материала, МПа	170	229
Плотность обрабатываемого материала, кг/м <sup>3</sup>	7826	7820
Коэффициент Пуассона обрабатываемого материала	0,26	0,28
Модуль упругости обрабатываемого материала, МПа	0,00002	0,0000207

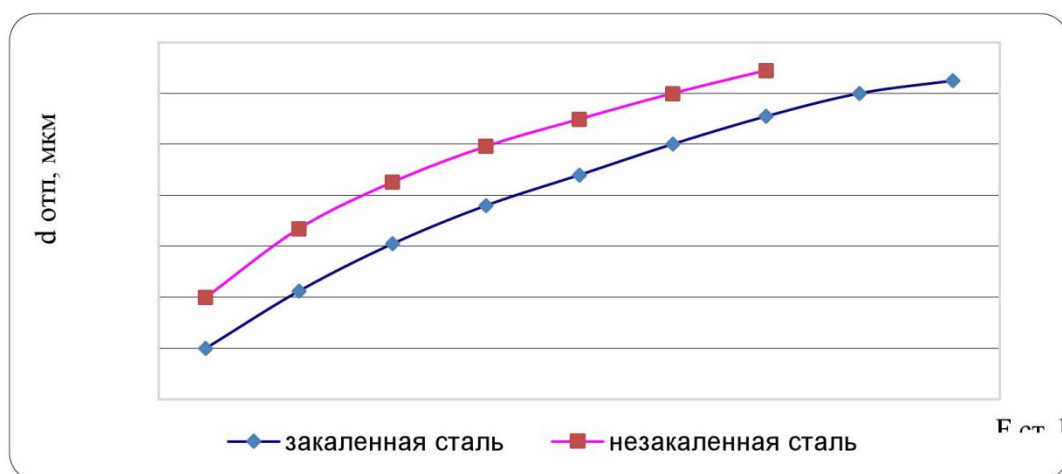


Рис. 6. График зависимости диаметра отпечатка  $d_{отп}$  от статического усилия  $F_{ст}$   
 Fig. 6. The dependence of the imprint diameter  $d_{отп}$  on the static force  $F_{ст}$

$$V = 60 \cdot l_v \cdot f \quad (2)$$

### Результаты и обсуждение

Исходя из расчетов диаметров отпечатков при обработке стали 45 в незакаленном и закаленном состоянии, получены максимальные значения величин подачи и скорости при обработке закаленной и незакаленной стали 45 пьезокерамическим инструментом с амплитудой колебаний  $2A=5$  мкм.

Так, максимальное значение подачи при обработке с максимальным статическим усилием закаленных сталей составляет 0,293 мм/об, при обработке незакаленных 0,297 мм/об. Максимальное значение скорости: 351 м/мин (для закаленных) и 356 м/мин.

Минимальное значение подачи ограничивается технологическими возможностями оборудования. Так на станке 1A62 значение минимальной подачи составляет 0,065 мм/об. Минимальное значение скорости определяется диаметром обрабатываемой детали и минимально возможным значением числа оборотов шпинделя.

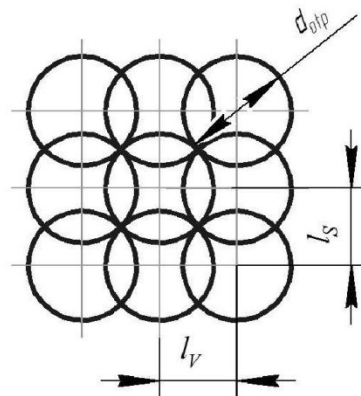


Рис. 7. Формирование микрорельефа поверхности при ультразвуковой обработке ( $l_s$  и  $l_v$  – расстояние между соседними ударами индентора в направлении подачи и скорости, соответственно)

Fig. 7. Formation of surface microrelief by ultrasonic surface hardening ( $l_s$  and  $l_v$  - distance between neighboring imprints of the indenter in the direction of feed and speed, respectively)



### Выводы

В результате теоретических исследований были определены области значений технологических параметров ультразвукового пластического деформирования цилиндрических деталей с тонкослойными покрытиями при использовании пьезо-керамического инструмента.

Диапазон величин статического усилия при

обработке стали 45 ограничен значениями 50 - 122 Н для незакаленной стали и 50 - 138 Н для закаленной. При этом величина диаметра единичного отпечатка колеблется от 0,310 мм до 0,420 мм. Для обеспечения регулярного микрорельефа за счет перекрытия соседних отпечатков в направлении скорости и подачи необходимо задавать значения скорости не более 350 м/мин, а подачи - не более 0,293 мм/об.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белый, А.Н. Исследование влияния отжига на адгезионную прочность покрытий, сформированных деформационным плакированием гибким инструментом / А.Н. Белый, К.Е. Белявин, М.А. Леванцевич // Инновации в машиностроении: сб. трудов VII Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – С. 429 – 432.
2. Осаждение защитных теплоотражающих покрытий с помощью плазмы магнетронного разряда / О.Х. Асаинов, Д.Д. Баинов, Р.А. Ермолаев, В.П. Кривобоков, А.А. Черныгина // Известия высших учебных заведений. Физика. – Томск, 2014. – т. 57, № 3-3, С. 44-46.
3. Влияние тонкослойных нанопокровов на фреттинг-коррозию высоконагруженных сопряжений крупногабаритных деталей машин / В.А. Красный, В.В. Максarov, Р.В. Вьюшин // Металлообработка, 2013. – № 5-6 (77-78). – С. 63-67.
4. Ожегов, Н.М. Эффективность методов прецизионной наплавки тонкослойных покрытий сжатой дугой / Н.М. Ожегов, С.А. Ермаков, Д.А. Капошко // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика. Материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 14-15 апреля 2016 г. – С. 72-79.
5. Формирование тонкослойного ванадийсодержащего покрытия блочных катализаторов очистки сбросных газов диоксида серы / А.Н. Гришин, С.А. Лаврищева, Л.А. Нефедова // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2011. – № 12. – С. 21-23.
6. Рамазанова, Ж.М. Влияние режимов микродугового оксидирования и состава электролитов на получение тонкослойных оксидных покрытий с квазипериодическим расположением пор / Ж.М. Рамазанова, А.И. Мамаев // Перспективные материалы. 2004. – № 4. – С. 82-85.
7. Кузнецов, В.А. Исследования влияния износостойкого покрытия и РМР на характер износа инструмента и достигаемые параметры качества при деформирующем протягивании / В.А. Кузнецов, Т.Д. Тимофеева // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2011. – №2. – С. 25-30.
8. 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, A. Lamikiz, B.N. Mordiyuk, G.I. Prokopenko // Surface and Coatings Technology. 2015. – Vol. 278. – P. 108-120.
9. Panin, A.V. 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.
10. Пластическое деформирование наплавленных покрытий / В.Г. Буров, И.А. Батаев, Е.Е. Корниенко, А.А. Дробяз // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2010. – № 1. – С.93-98.
11. Kovalevskaya, Zh.G. Some features of the formation of the surface microrelief of steel under ultrasonic finishing treatment / Zh.G. Kovalevskaya, P.V. Uvarkin, A.I. Tolmachev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2012. – Vol. 48. – Iss. 3. – P. 153-158.
12. Gileta, V.P. Investigation into regularities of the surface microgeometry formation during diamond ultrasonic strengthening finishing / V.P. Gileta, G.A. Iskhakova // Sverkhtverdye Materialy. – 1992. – Iss. 1. – P. 45-50.
13. Research of AISI 321 steel microrelief after ultrasonic impact treatment with marker applying / A.A. Fedorov, D.A. Polonyankin, A.I. Blesman, D.V. Postnikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 944, Iss. 1, № 012035
14. Формирование напряженного состояния поверхностных слоев сплавов в результате импульсной ультразвуковой обработки / С.В. Веселов, Д.Е. Головин, И.А. Батаев, В.Г. Буров // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. – 2007. – №4 (37). – С.30-32.
15. Рахимьянов Х. М. Повышение качества поверхностного слоя деталей с покрытиями малой толщины из нанокристаллических порошков ультразвуковым пластическим деформированием / Х. М. Рахимьянов

нов, Ю. С. Семенова, М. А. Третьяков // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. – 2011. – № 3 (52). – С. 18–22.

16. Рахимьянов Х. М. Теоретическое обоснование области режимных параметров ультразвукового деформирования для обеспечения чистового и упрочняющего эффектов в обработке металлических материалов / Х. М. Рахимьянов, К. Х. Рахимьянов, Ю. С. Семенова, А. С. Еремина // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 4 (28). С. 55-61.

17. Установка для ультразвукового пластического деформирования по токарной схеме / Х. М. Рахимьянов, Ю. С. Семенова, М. А. Третьяков // Наука. Технологии. Инновации // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск. 2009. Часть 3. С. 44-46.

## REFERENCES

1. A.N. Belyy, K.E. Belyavin, M.A. Levantsevich. Issledovanie vliyaniya otzhiga na adgezionnuyu prochnost' pokrytiy, sformirovannykh deformatsionnym plakirovaniem gibkim instrumentom [Investigation of the effect of annealing on the adhesive strength of coatings formed by deformation cladding by a flexible tool]. *Innovatsii v mashinostroenii: sb. trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii /pod red. V.Yu. Blyumenshteyna* [Innovations in mechanical engineering: proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference / ed. V.Yu. Blumenstein]. – Kemerovo: KuzGTU. 2015. – p. 429 – 432.

2. O.Kh. Asainov, D.D. Bainov, R.A. Ermolaev, V.P. Krivobokov, A.A. Chernyatina. Osazhdenie zashchitnykh teplootrazhayushchikh pokrytiy s pomoshch'yu plazmy magnetronnogo razryada [Precipitation of protective heat-reflecting coatings by the magnetron discharge plasma]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. [News of higher educational institutions. Physics] – Tomsk, 2014. – Iss.57, no. 3-3, P. 44-46.

3. V.A. Krasnyy, V.V. Maksarov, R.V. Vyushin. Vliyanie tonkosloynnykh nanopokrytiy na fretting-korroziyu vysoko-nagruzhennykh sopryazheniy krupnogabaritnykh detaley mashin [Influence of thin-layer nanocoatings on fretting corrosion of highly loaded couplings of large-sized machine parts]. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2013. – no. 5-6 (77-78). – P. 63-67.

4. N.M. Ozhegov, S.A. Ermakov, D.A. Kaposhko. Effektivnost' metodov pretsizionnoy naplavki tonkosloynnykh pokrytiy szhatoy dugoy [Efficiency of methods for precision deposition of thin-layer coatings by a compressed arc]. *Tekhnologii uprochneniya, naneseniya pokrytiy i remonta: teoriya i praktika. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technologies of hardening, coating and repair: theory and practice. Materials of the international scientific-practical conference]. Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 14-15 aprelya 2016. – P. 72-79.

5. A.N. Grishin, S.A. Lavrishcheva, L.A. Nefedova. Formirovanie tonkosloynnogo vanadiysoderzhashchego pokrytiya blochnykh katalizatorov oчитки sbrosnykh gazov dioksida sery [Formation of thin-layer vanadium-containing coating of block catalysts for purification of sulfur dioxide discharge gases]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [News of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)]. 2011. – № 12. – P. 21-23.

6. Zh.M. Ramazanova, A.I. Mamaev. Vliyanie rezhimov mikrodogovogo oksidirovaniya i so-stava elektrolitov na poluchenie tonkosloynnykh oksidnykh pokrytiy s kvaziperiodicheskim raspolozheniem por [The effect of microarc oxidation regimes and the composition of electrolytes on the production of thin-layer oxide coatings with a quasiperiodic arrangement of pores]. *Perspektivnye materialy* [Perspective materials]. 2004. – № 4. – P. 82-85.

7. V.A. Kuznetsov, T.D. Timofeeva. Issledovaniya vliyaniya iznosostoykogo pokrytiya i RMR na kharakter iznosa instrumenta i dostigaemye parametry kachestva pri deformiruyushchem protyagivani [Investigations of the influence of wear-resistant coating and RMR on the nature of tool wear and the quality parameters achieved with deforming broaching]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. [Repair. Recovery. Modernization] 2011. – №2. – P. 25-30.

8. D.A. Lesyk, S. Martinez, V.V. Dzhemelinskyy, A. Lamikiz, B.N. Morduk, G.I. Prokopenko. Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel. *Surface and Coatings Technology*. 2015. – Vol. 278. – P. 108-120.

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

10. V.G. Burov, I.A. Bataev, E.E. Kornienko, A.A. Drobyaz. Plasticheskoe deformirovanie naplavlennykh pokrytiy [Plastic deformation of deposited coatings]. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Shadow University]. 2010. – № 1. – P.93-98.

11. Zh.G. Kovalevskaya, P.V. Uvarkin, A.I. Tolmachev. 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.

12. V.P. Gileta, G.A. Iskhakova. Investigation into regularities of the surface microgeometry formation dur-



ing diamond ultrasonic strengthening finishing. *Sverkhтвердые Materialy*. 1992. – Iss. 1. – P. 45-50.

13. A.A. Fedorov, D.A. Polonyankin, A.I. Blesman, D.V. Postnikov. Research of AISI 321 steel microrelief after ultrasonic impact treatment with marker applying. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. – Vol. 944, Iss. 1, № 012035

14. S.V. Veselov, D.E. Golovin, I.A. Bataev, V.G. Burov. Formirovanie napryazhennogo sostoyaniya poverkhnostnykh sloev splavov v rezul'tate impul'snoy ul'trazvukovoy obrabotki [Formation of stress state of surface layers of alloys as a result of pulsed ultrasonic treatment]. *Obrabotka metallov: Tekhnologiya. Oborudovanie. Instrumenty*. [Processing of metals: Technology. Equipment. Instruments]. 2007. – №4 (37). – P.30-32.

15. Kh. M. Rakhimyanov, Yu. S. Semenova, M. A. Tret'yakov. Povyshenie kachestva poverkhnostnogo sloya detaley s pokrytiyami maloy tolshchiny iz nanokristallicheskikh poroshkov ul'trazvukovym plasticheskim deformirovaniem [Surface layer refinement of detales with small coating thickness made of nanocrystalline powder by ultrasonic surface plastic deformation]. *Obrabotka metallov: Tekhnologiya. Oborudovanie. Instrumenty*. [Processing of metals: Technology. Equipment. Instruments]. 2011. – № 3 (52). – P. 18–22.

16. Kh. M. Rakhimyanov, K. Kh. Rakhimyanov, Yu. S. Semenova, A. S. Eremina. Teoreticheskoe obosnovanie oblasti rezhimnykh parametrov ul'trazvukovogo deformirovaniya dlya obespecheniya chistovogo i uprochnyayushchego effektivov v obrabotke metallicheskikh materialov [Theoretical justification for the range of operating parameters of ultrasonic deformation for ensuring finishing and hardening effects in processing metallic materials]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2015. № 4 (28). P. 55-61.

17. Kh. M. Rakhimyanov, Yu. S. Semenova, M. A. Tret'yakov. Ustanovka dlya ul'trazvukovogo plasticheskogo deformirovaniya po tokarnoy skheme [Installation for ultrasonic plastic deformation in the turning scheme]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh v 7-mi chastyakh* [Science. Technologies. Innovations: Proceedings of the all-Russian scientific conference of young scientists in 7 parts.]. Novosibirsk. 2009. Vol. 3. P. 44-46.

Поступило в редакцию 20.04.2018

Received 20.04.2018