

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-76-83

УДК 621.789

**УЛЬТРАЗВУКОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 20,  
СФОРМИРОВАННОГО В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО  
НАГРЕВА****ULTRASONIC STRENGTHENING OF SURFACE LAYER OF STEEL 20 FORMED  
IN ELECTROLYTE-PLASMA HEATING CONDITIONS****Рахимьянов Харис Магсуманович,**доктор техн. наук, профессор, e-mail: [x.rakhimyanov@corp.nstu.ru](mailto:x.rakhimyanov@corp.nstu.ru),**Kharis M. Rakhimyanov, D.Sc. (Engineering), Professor,****Рахимьянов Константин Харисович,**кандидат техн. наук, доцент, e-mail: [rakhimyanov@corp.nstu.ru](mailto:rakhimyanov@corp.nstu.ru),**Konstantin Kh. Rakhimyanov, Ph.D. (Engineering), Associate Professor****Еремина Анна Сергеевна, e-mail: [8951048@mail.ru](mailto:8951048@mail.ru)****Anna S. Eryomina****Аль-Обайди Луаи Мохаммед Раджаб,**аспирант, e-mail: [luayrajab@yahoo.com](mailto:luayrajab@yahoo.com)**Al-Obaidi Luay Mohammed Rajab, Postgraduate 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:** Показана эффективность использования ультразвукового пластического деформирования поверхностного слоя стали 20 после цементации и заковки в условиях электролитно-плазменного нагрева. На основании проведения экспериментальных исследований с использованием математического планирования получено уравнение регрессии, устанавливающее взаимосвязь микротвердости и режимных параметров ультразвукового пластического деформирования – скорости, подачи и статического усилия. Установлено, что использование ультразвукового пластического деформирования в формировании поверхностного слоя после химико-термической обработки в электролитной плазме позволило повысить значение микротвердости с 6000 МПа до 8000 МПа, а также сформировать на поверхности специфичный регулярный микрорельеф. Проведена оптимизация режимных параметров ультразвукового пластического деформирования, обеспечивающего максимальный прирост микротвердости.

**Abstract:** The efficiency of ultrasonic plastic deformation of the surface layer of steel 20 after cementation and thermohardening during electrolyte-plasma heating is shown. Based on research using mathematical planning, a regression equation is obtained that establishes the correlation between the microhardness and the regime parameters of ultrasonic plastic deformation – speed, feed and static force. It is established that the use of ultrasonic plastic deformation in the formation of the surface layer after chemical-thermal treatment in electrolyte plasma increased microhardness from 6000 MPa to 8000 MPa, and also formed a specific regular microrelief on the surface. Optimization of the regime parameters of ultrasonic plastic deformation providing maximum microhardness increase is carried out.

**Ключевые слова:** ультразвуковое пластическое деформирование, микротвердость, микрорельеф, цементация, математическое планирование.

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

**Введение**

Повышение прочностных характеристик поверхностного слоя деталей машин и инструментов является важной задачей на пути обеспечения их

надежности и долговечности при эксплуатации. Известно, что надежность и долговечность деталей машин при эксплуатации в условиях трения во многом определяется такими характеристиками

качества поверхностного слоя как микротвердость и микрогеометрия поверхности.

В настоящее время существует значительный арсенал технологических методов формирования высокопрочного состояния поверхностного слоя, в том числе комбинированных, основанных на сочетании термических и деформационных процессов в одной обработке [1, 2]. Перспективным для достижения высоких характеристик качества поверхностного слоя деталей машин и инструментов представляется использование химико-термической обработки, в частности, цементации в электролитной плазме [3, 4] и ультразвукового пластического деформирования (УЗПД) [5-11]. Данная комбинация процессов интересна тем, что при использовании в качестве материала детали низкоуглеродистой стали, возможно на первом этапе обработки за счет цементации и закалки в электролитной плазме получить высокопрочное состояние материала в пределах поверхностного слоя, соответствующее закаленным высокоуглеродистым структурам, а затем с помощью УЗПД реализовать механизмы деформационного упрочнения. Несмотря на то, что механизмы, задействованные в упрочнении, для комбинируемых обработок различаются, объемы материала поверхностного слоя, в которых они реализуются, находятся примерно на одном масштабном уровне.

Так в исследованиях работы [12] показано, что при цементации стали 20 в электролитной плазме возможно формирование высокопрочного поверхностного слоя толщиной до 200 мкм. При этом максимальное значение микротвердости в пределах поверхностного слоя достигало 9000-9300 МПа, тогда как на поверхности ее значение составляло только 6000 МПа. Снижение микротвердости в верхней части поверхностного слоя объясняется наличием остаточного аустенита в этой зоне и является характерным при закалке структур с высоким содержанием углерода, а с другой – процессами самоотпуска при охлаждении в проточном электролите. Результаты исследований теоретического и экспериментального характера [1, 2] свидетельствуют о том, что очаг распространения пластической деформации при УЗПД закаленных структур составляет 0,2-0,25 мм. Использование ультразвукового пластического деформирования после электролитно-плазменной цементации и закалки, направленное на реализацию механизмов деформационного упрочнения закаленных структур и структурно-фазовых превращений (снижение доли остаточного аустенита вблизи поверхности), реализует выполнение еще одной задачи в обеспечении качества поверхностного слоя – формирования специфического маслоудерживающего микрорельефа на поверхности, что является благоприятным фактором при эксплуатации в условиях полужидкостного трения.

Целью настоящего исследования является оп-

тимизация режимных параметров ультразвукового пластического деформирования поверхностного слоя стали 20, сформированного в условиях электролитно-плазменной цементации и закалки.

Для использования полученных результатов экспериментальных исследований в обработке деталей рассматриваемым комбинированным технологическим методом необходимо выявить взаимосвязь основных показателей процесса с параметрами технологических режимов обработки.

### Теория

Как известно, методы математического планирования используются как инструмент, позволяющий существенно сократить число опытов, а также установить взаимосвязь между параметром оптимизации и технологическими режимами обработки. К переменным факторам и исследуемым параметрам предъявляются определенные требования. В частности, факторы должны быть управляемыми, совместимыми, независимыми и оказывать непосредственное воздействие на исследуемый параметр.

Параметры оптимизации должны быть универсальны, иметь физический смысл, быть воспроизводимыми и количественно выражаться. Так для операции ультразвукового пластического деформирования в качестве параметра оптимизации целесообразно выбрать микротвердость материала поверхностного слоя, так как данный параметр оценивает эффективность процесса и имеет ясный физический смысл.

Введение ультразвукового пластического деформирования после электролитно-плазменного упрочнения направлено на достижение нескольких эффектов. Во-первых, УЗПД позволяет дополнительно упрочнить поверхностный слой, закаленный ранее на предшествующей операции химико-термической обработки, что обеспечивает повышение микротвердости поверхностного слоя. Во-вторых, при ультразвуковом деформационном воздействии на поверхности формируется регулярный маслосъемный микрорельеф, ответственный за реализацию отделочного эффекта, при этом снижая уровень шероховатости поверхности от предшествующей обработки.

Известно, что динамические параметры ультразвукового воздействия определяются амплитудой, частотой и статическим усилием, которые ответственны за образование на обрабатываемой поверхности пластических отпечатков определенного размера. С точки зрения управления деформационным процессом при УЗПД наиболее удобным режимным параметром является статическое усилие. Выбор оптимального значения  $P_{ст}$  обуславливается необходимостью создания пластического отпечатка на обрабатываемой поверхности определенного размера. Так в случае УЗПД закаленной стали 20 со значениями исходной микротвердости 6000 МПа при достижении максимального упрочняющего эффекта диаметр пластиче-

ского отпечатка *domn* составляет  $\sim 0,2$  мм [13].

В виду того, что сущность ультразвуковой обработки заключается в дробном (порционном) деформационном воздействии на обрабатываемую поверхность, в результате которого на ней образуются отдельные единичные отпечатки, то для реализации данной технологии упрочнения конкретных деталей необходимо нанесение на обрабатываемую поверхность серии таких отпечатков с соответствующим пространственным распределением.

Так, при обработке цилиндрических деталей пространственное распределение отпечатков обеспечивается приданием детали кинематических движений – вращения вокруг собственной оси ( $V$ ) и продольного перемещения ( $S$ ).

Стоит отметить, что необходимое распределение пластических отпечатков по обрабатываемой поверхности обуславливается определением оптимального коэффициента перекрытия отпечатков  $k$ , значение которого должны быть менее 1.

Величина данного коэффициента определяет кратность деформационного воздействия на элементарный объем материала. Так, назначение заниженных значений отмеченных кинематических параметров при ультразвуковом пластическом деформировании не позволит обеспечить оптимальный коэффициент перекрытия отдельных отпечатков. При этом на поверхности детали единичные отпечатки будут чрезмерно плотно накладываться друг на друга, что вызовет переупрочнение материала поверхностного слоя. С другой стороны, использование завышенных значений  $V$  и  $S$  приведет к появлению недоупрочненных зон

между отпечатками, обуславливающих снижение микротвердости материала поверхностного слоя.

Следовательно, для достижения необходимых упрочняющего и отделочного эффектов при ультразвуковом пластическом деформировании необходим подбор оптимальных значений режимных параметров данной обработки –  $V$ ,  $S$  и  $P_{ст}$ .

Исходя из данных соображений и результатов предварительных экспериментальных исследований, были определены интервалы варьирования переменных факторов.

Влияние указанных факторов – статического усилия, скорости и подачи на реализацию процесса ультразвукового пластического деформирования подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований.

При планировании эксперимента в качестве модели был выбран полином 2-го порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

При анализе уравнения регрессии были учтены только статистически значимые коэффициенты, определяемые по формулам, указанным в работе [14]. Статистическая значимость коэффициентов была оценена при помощи критерия Стьюдента. Проверка уравнения регрессии на адекватность экспериментальным результатам осуществлялось по критерию Фишера при 5% уровне значимости [15].

Принятые уровни варьирования переменных факторов представлены в таблице.

Уровни варьирования переменных факторов УЗПД

Переменные Уровни варьирования	Скорость, $V$ ( $X_1$ )		Подача, $S$ ( $X_2$ )		Статическое усилие, $P_{ст}$ ( $X_3$ )	
	код ед.	м/мин	код ед.	мм/об	код ед.	Н
Основной	0	54,16	0	0,056	0	90
Нижний	-1	32,97	-1	0,035	-1	49
Верхний	+1	75,36	+1	0,075	+1	131
Нижняя звездная точка	-1,215	28,26	-1,215	0,030	-1,215	40
Верхняя звездная точка	+1,215	84,78	+1,215	0,080	+1,215	140
Интервал варьирования	-	42,39	-	0,040	-	82



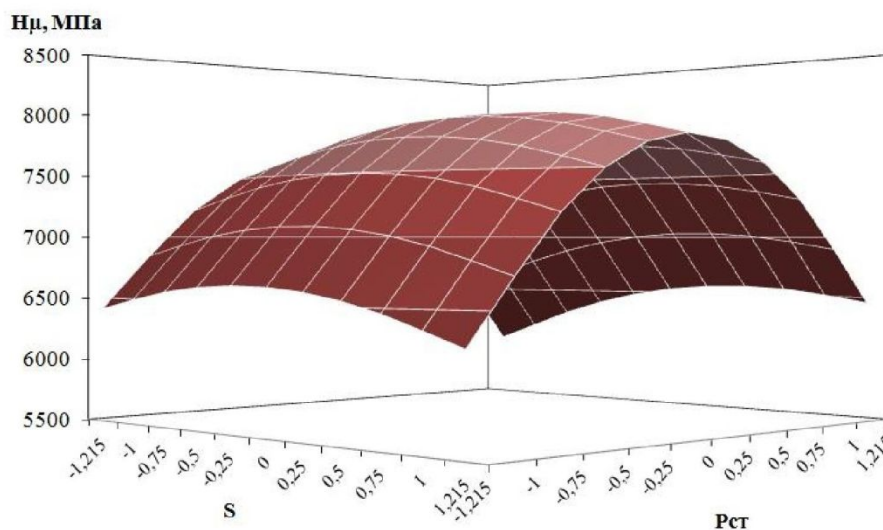


Рис. 1. Зависимость микротвердости поверхностного слоя от подачи ( $S$ ) и статического усилия ( $P_{ст}$ ) при фиксированном значении скорости ( $V=54,16$  м/мин)

Fig. 1. Dependence of the microhardness of the surface layer on the feed ( $S$ ) and static force ( $P_{ст}$ ) at a fixed speed ( $V=54.16$  m/min)

В соответствии с установленными уровнями варьирования была составлена матрица планирования экспериментальных исследований по оптимизации ультразвукового пластического деформирования образцов после электролитно-плазменной цементации и закалки.

По результатам обработки данных экспериментальных исследований было получено уравнение регрессии для расчета параметра оптимизации “ $Y$ ” (микротвердости поверхностного слоя):

$$Y = 8012,71 + 56,68X_1 + 55,57X_2 - 39,07X_3 - 209,14X_1^2 - 198,94X_2^2 - 970,97X_3^2 - 1,25X_1X_2 + 131,25X_1X_3 + 101,25X_2X_3 \quad (2)$$

Анализ уравнения (2) показывает, что на значение микротвердости поверхностного слоя оказывают влияние все задействованные в экспериментах переменные факторы, о чем свидетельствуют значения коэффициентов уравнения регрессии, в число которых вошли только статистически значимые величины.

На основе полученных данных была построена многомерная графическая модель  $H\mu = f(S, P_{ст})$ , при фиксированном значении  $V$ , представленная на рисунке 1.

Внешний вид данной графической модели свидетельствует о наличии оптимальных значений переменных факторов, подтверждая правильность выбора диапазона варьирования исследуемых режимных параметров.

Однако, в виду неудобства анализа поверхности отклика в виде многомерной графической модели, соответствующей полученному полиному (2), его графическое отображение целесообразно

представить в виде плоских зависимостей  $H\mu=f(V)$ ,  $H\mu=f(S)$ ,  $H\mu=f(P_{ст})$ , полученных сечением поверхности отклика при фиксированных значениях остальных переменных факторов.

#### Результаты и обсуждение

Анализ экспериментальных данных (рис. 2) свидетельствует о том, что микротвердость поверхностного слоя увеличивается не во всем исследуемом диапазоне статических усилий. Так, для всех значений скорости обработки увеличение  $P_{ст}$  от значений 40 до 90 Н приводит к росту микротвердости до максимальных значений. Данный рост объясняется тем, что повышение статического усилия до отмеченных значений позволяет создавать в поверхностном слое напряжения, обеспечивающие необходимый уровень пластической деформации. Однако, при дальнейшем повышении  $P_{ст}$  от 90 до 140 Н происходит существенное снижение микротвердости поверхностного слоя. Данное обстоятельство объясняется невозможностью материала воспринимать повышенные деформационные нагрузки, в результате чего происходит его разупрочнение.

Результаты исследования влияния скорости вращения детали  $V$  на микротвердость поверхностного слоя также подтверждают наличие ее оптимальных значений. Максимальное значение микротвердости при этом также составляет 8012 МПа, что соответствует значению скорости вращения детали  $V=54,16$  м/мин при подаче  $S=0,055$  мм/об (рис. 3, кривая 3). Дальнейшее увеличение  $V$  приводит к снижению микротвердости, что объясняется возникновением переупрочненных зон вследствие чрезмерно большого числа отпечатков, приходящихся на единицу площади обрабатываемой поверхности.

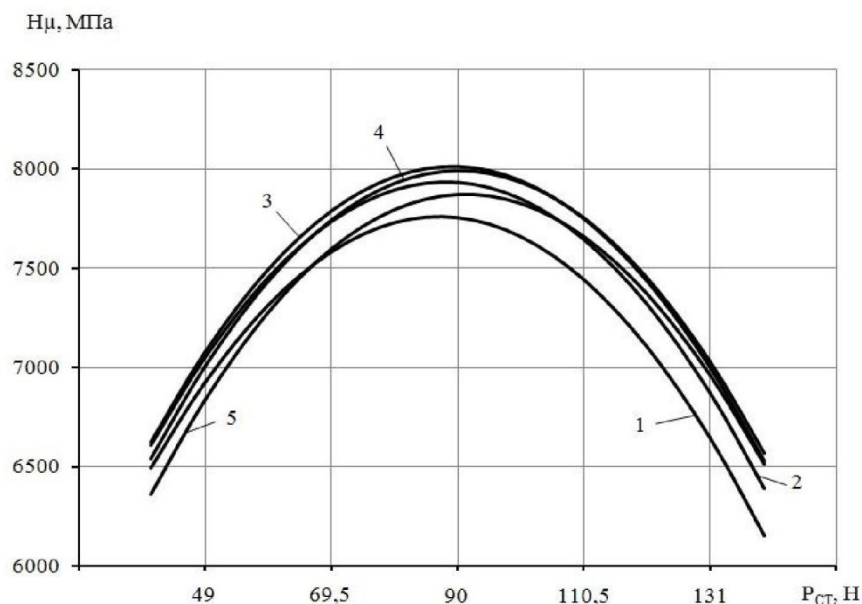


Рис. 2. Зависимость микротвердости поверхностного слоя от  $P_{ст}$  при  $S=0,055$  мм/об:

1 –  $V=32,97$  м/мин; 2 –  $V=43,56$  м/мин; 3 –  $V=54,16$  м/мин; 4 –  $V=64,76$  м/мин;  
5 –  $V=75,36$  м/мин

Fig. 2. Dependence of the microhardness of the surface layer on  $P_{ст}$  at  $S=0.055$  mm/rev:

1 –  $V = 32.97$  m/min; 2 –  $V = 43.56$  m/min; 3 –  $V = 54.16$  m/min; 4 –  $V = 64.76$  m/min;  
5 –  $V = 75.36$  m/min

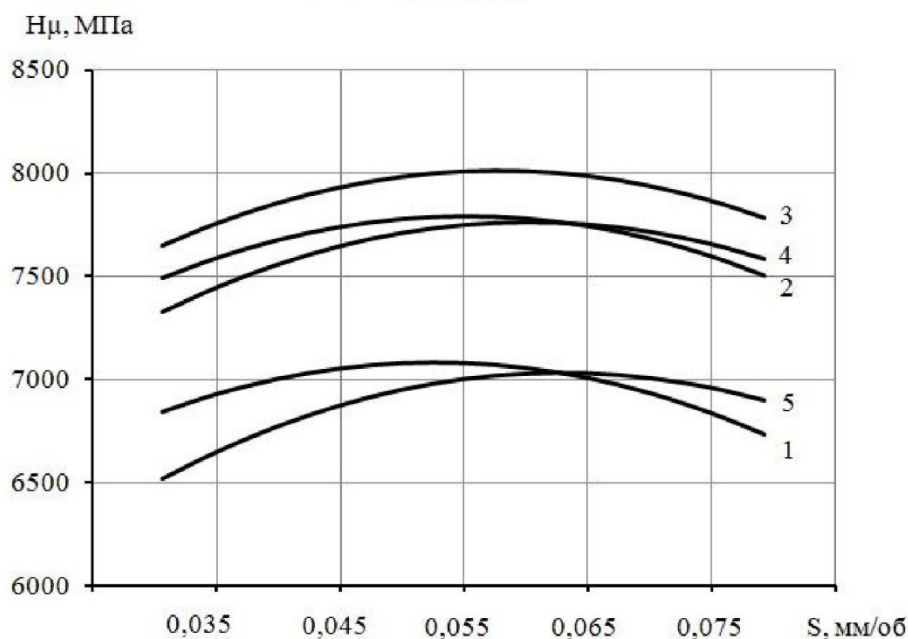


Рис. 3. Зависимость микротвердости поверхностного слоя от скорости вращения  $V$  при  $P_{ст}=90$  Н:

1 –  $S=0,035$  мм/об; 2 –  $S=0,045$  мм/об; 3 –  $S=0,055$  мм/об; 4 –  $S=0,065$  мм/об;  
5 –  $S=0,075$  мм/об

Fig. 3. Dependence of the microhardness of the surface layer on the rotation speed  $V$  at  $P_{ст} = 90$  N:

1 –  $S = 0.035$  mm/rev; 2 –  $S = 0.045$  mm/rev; 3 –  $S = 0.055$  mm/rev; 4 –  $S = 0.065$  mm/rev;  
5 –  $S = 0.075$  mm/rev

При рассмотрении влияния величины подачи на значение микротвердости поверхностного слоя наблюдается аналогичная картина. Так, максимальное ее значение достигается назначением величины подачи  $S=0,055$  мм/об (рис. 4, кривая 3).

Использование более высоких значений подачи также приводит к снижению значения микротвердости. Данная зависимость объясняется образованием неупрочненных зон на поверхности обрабатываемой детали вследствие недостаточного ко-



личества отдельных отпечатков на единицу площади поверхности.

На рисунке 5 представлена морфология поверхности после ультразвукового пластического деформирования, подтверждающая формирование на поверхности регулярного микрорельефа.

#### Выводы

При помощи методов математического планирования получено уравнение регрессии, позволяющее установить взаимосвязь микротвердости

поверхностного слоя с основными технологическими параметрами процесса – статическим усилием, скоростью вращения детали и подачей. Определены оптимальные значения  $P_{ст}=90$  Н,  $V=54,16$  м/мин и  $S=0,055$  мм/об, обеспечивающие максимальное значение микротвердости  $H_{\mu}=8012$  МПа.

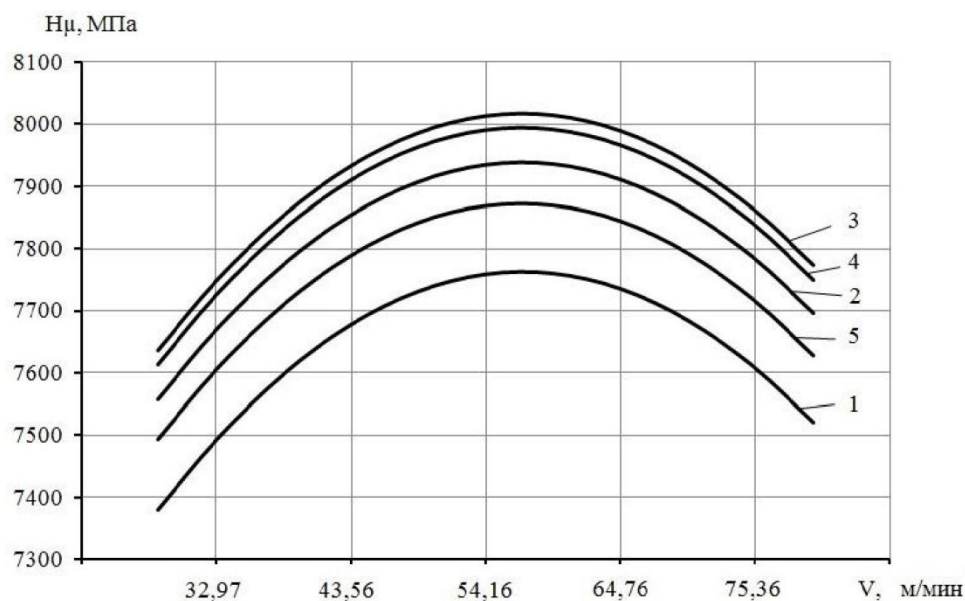


Рис. 4. Зависимость микротвердости поверхностного слоя от подачи  $S$  при  $V=54,16$  м/мин:

1 –  $P_{ст}=49$  Н; 2 –  $P_{ст}=69,5$  Н; 3 –  $P_{ст}=90$  Н;  
 4 –  $P_{ст}=110,5$  Н; 5 –  $P_{ст}=131$  Н

Fig. 4. Dependence of the microhardness of the surface layer on the feed  $S$  at  $V = 54.16$  m/min:

1 –  $P_{ст} = 49$  N; 2 –  $P_{ст} = 69.5$  N; 3 –  $P_{ст} = 90$  N; 4 –  $P_{ст} = 110.5$  N; 5 –  $P_{ст} = 131$  N

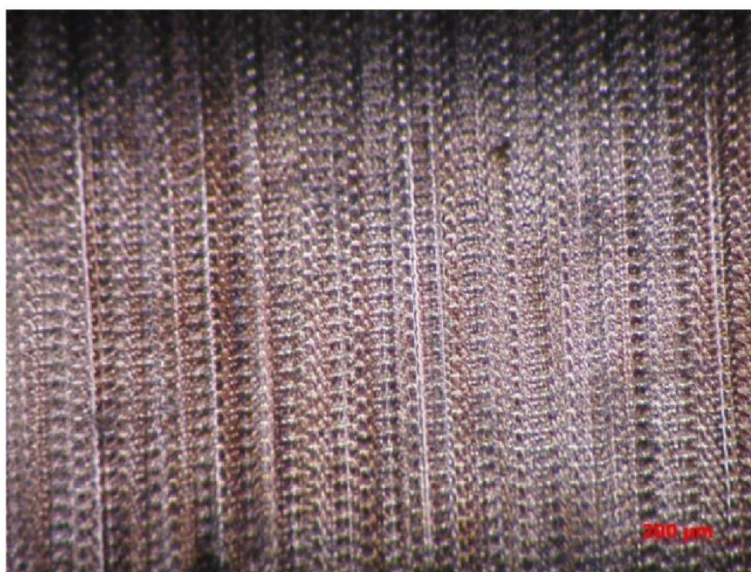


Рис. 5. Микрорельеф поверхности образца после ультразвукового пластического деформирования

Fig. 5. Microrelief of the sample surface after ultrasonic plastic deformation

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванцовский В. В. М. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и финишной механической обработки / В. В. Иванцовский, Х. М. Рахимьянов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – №6. С. 43-46.
2. Рахимьянов, Х. М. Поверхностное упрочнение с использованием низкотемпературной плазмы и ультразвука / Х. М. Рахимьянов, Г. А. Исхакова // Электронная обработка материалов – 1990. – №5. С. 9-12.
3. Белкин П. Н. Химико-термическая обработка сталей и порошковых сплавов / П. Н. Белкин А.Б. Белихов, С.Н. Бошин и др. – Кострома: Изд-во КГТУ, 1998. – 114 с.
4. Суминов И. В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов, Т.1 / И. В. Суминов, П. Н. Белкин, А. В. Эпельфельд и др. – М.: Техносфера, 2011. – 464 с.
5. Гилета В. П. Повышение стойкости вытяжных пуансонов / В. П. Гилета, В. Б. Асанов, А. И. Безнедельный // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2007. № 4 (37). С. 11-12.
6. Безнедельный А. И. Влияние технологической наследственности на формирование качества поверхностного слоя закаленных сталей при упрочняюще-чистовой обработке ультразвуковым инструментом / А. И. Безнедельный, В. Б. Асанов, В. П. Гилета // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 4 (57). С. 19-22.
7. Абрамов О. В. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов / О. В. Абрамов, В. И. Добаткин, В. Ф. Казанцев и др. – М.: Наука, 1986. – 278 с.
8. E.Sh. Statnikov, V.N. Vityazev, O.V. Korolkov, Study of comparative characteristics of ultrasonic impact and optimization of deformation treatment processes, The 4th International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies, MMT (2006) 110-119.
9. V.A. Klimenov, Zh.G. Kovalevskaya, O.N. Nekhoroshkov, P.V. Uvarin, V.P. Tolstov, Increasing of life-time for wheels, rails, shafts and axes using ultrasonic processing of surface, Proceedings of the 14th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2005 Czech Republic, Hrades nad Moravici, Ostrava, May 24-26 (2005) 214-221.
10. V.I. Bagrov, D.S. Fatjulin, J.V. Jurjev, Ultrasonic superficial plastic deformation. XXII Session of the Russian Acoustics Moscow, June 15-17 (2010) 295-297.
11. Sanda, A., Garcia Navas, V., Gonzalo. O. Surface state of Inconel 718 ultrasonic shot peened: Effect of processing time, material and quantity of shot balls and distance from radiating surface to sample. Materials and Design, 2011, Vol. 32, 2213-2220.
12. Еремина А. С. Обеспечение упрочняющего и отделочного эффектов на этапах плазменно-электролитной цементации и ультразвукового пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – №11 (143). С. 27-31.
13. Семенова Ю.С. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей ультразвуковым пластическим деформированием : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2012. 18 с.
14. Налимов В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 340 с.
15. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.

## REFERENCES

1. V.V. Ivancivskij, Kh. M. Rakhimyanov. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva poverhnostnogo sloja detalej mashin pri integracii poverhnostnoj termicheskoj i finishnoj mehanicheskoj obrabotki [Technological providing of quality of a surface layer of machine parts at integration of surface thermal and finishing processing]. Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija [Strengthening technologies and coatings]. 2005, no 6, pp. 43-46.
2. Kh. M. Rakhimyanov., G.A. Iskhakova. Poverhnostnoe uprochnenie s ispol'zovaniem nizkotemperaturnoj plazmy i ul'trazvuka [Surface hardening by low-temperature plasma and ultrasound]. Jelektronnaja obrabotka materialov [Electronic material processing]. 1990, no5, pp. 9-12.
3. P.N. Belkin. Himiko-termicheskaja obrabotka stalej i poroshkovyh spлавov [Chemical-thermal treatment of steels and powder alloys]. Kostroma, KGTU Publ., 1998. 114 p.
4. I.V. Suminov. P.N. Belkin, A.V. Ehpelfeld. Plazmenno-jelektroliticheskoe modifitsirovanie poverhnosti metallov i сплавов [Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys]. Moscow, Technosfera Publ., 2011. Vol 1. 464 p.
5. V.P. Gileta, V.B. Asanov, A.I. Beznedel'nyj, Povyshenie stojkosti vytjazhnyh puansonov [Increasing the durability of the exhaust punches]. Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty) [Metal Working and Material Science]. 4 (37) (2007) 11-12 (in Russian).
6. A.I. Beznedel'nyj, V.B. Asanov, V.P. Gileta. Vlijanie tehnologicheskoi nasledstvennosti na formirovanie

kachestva poverhnostnogo sloja zakalennykh stalej pri uprochnijajushhe-chistovoj obrabotke ul'trazvukovym instrumentom [Technological inheritance influence on surface layer forming in condition of ultrasonic plastic deformation of hardened steels]. Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty) [Metal Working and Material Science]. 4 (57) (2012) 19-22 (in Russian).

7. O.V. Abramov, V.I. Dobatkin, V.F. Kazantsev. Vozdejstvie moshhnogo ul'trazvuka na mezhfaznuju poverhnost' metallov [Impact of powerful ultrasonic on the interphase surface of metals]. Moscow, 1986.

8. E.Sh. Statnikov, V.N. Vityazev, O.V. Korolkov, Study of comparative characteristics of ultrasonic impact and optimization of deformation treatment processes, The 4th International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies, MMT (2006) 110-119.

9. V.A. Klimenov, Zh.G. Kovalevskaya, O.N. Nekhoroshkov, P.V. Uvarkin, V.P. Tolstov, Increasing of life-time for wheels, rails, shafts and axes using ultrasonic processing of surface, Proceedings of the 14th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2005 Czech Republic, Hrades nad Moravici, Ostrava, May 24-26 (2005) 214-221.

10. V.I. Bagrov, D.S. Fatjulin, J.V. Jurjev, Ultrasonic superficial plastic deformation. XXII Session of the Russian Acoustics Moscow, June 15-17 (2010) 295-297.

11. Sanda, A., Garcia Navas, V., Gonzalo, O. Surface state of Inconel 718 ultrasonic shot peened: Effect of processing time, material and quantity of shot balls and distance from radiating surface to sample. Materials and Design, 2011, Vol. 32, 2213-2220.

12. A.S. Eremina. Obespechenie uprochnijajushhego i otdelochnogo jeffektov na jetapah plazmenno-jelektrolitnoj cementacii i ul'trazvukovogo plasticheskogo deformirovanija [Providing hardening and finishing effects at the stages of plasma electrolyte cementation and ultrasonic plastic deformation]. Uprochnijajushhie tehnologii i pokrytija [Strengthening technologies and coatings]. 2016, no. 11(143), pp. 27-31.

13. Yu.S. Semenova. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva poverhnostnogo sloja detalej ul'trazvukovym plasticheskim deformirovaniem [Technological providing of the quality of the surface layer of parts by ultrasonic plastic deformation]. Abstract of dissertation candidate degree. Barnaul, 2012. 18 p.

14. V.V. Nalimov. Statisticheskie metody planirovanija jekstremal'nyh jeksperimentov [Statistical methods for planning extreme experiments]. Moscow, Publ., 1965. 340 p.

15. L.Z. Rumshinskiy. Matematicheskaja obrabotka rezul'tatov jeksperimenta [Mathematical processing of experimental results]. Moscow, Publ, 1971. 192 p.

Поступило в редакцию 20.04.2018

Received 20.04.2018