УДК 621.923.01 Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-1-140-152

Для цитирования: Влияние обработки абразивным потоком на шероховатость и микротвердость поверхности малых каналов (отверстий) в образцах заготовок из стали 12Х18Н10Т / В. А. Левко, О. В. Литовка, А. Е. Петецкая и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2025. Т. 26, № 1. С. 140–152. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-1-140-152.

For citation: Levko V. A., Litovka O. V., Petetskaya A. E., Ivanov P. A., Snetkov P. A. [Effect of abrasive flow machining on the roughness and microhardness the small channels (holes) surface in samples of 12X18N10T steel workpieces]. *Siberian Aerospace Journal.* 2025, Vol. 26, No. 1, P. 140–152. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-1-140-152.

# Влияние обработки абразивным потоком на шероховатость и микротвердость поверхности малых каналов (отверстий) в образцах заготовок из стали 12X18H10T

В. А. Левко<sup>\*</sup>, О. В. Литовка, А. Е. Петецкая, П. А. Иванов, П. А. Снетков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31 \*E-mail: levko@sibsau.ru

Аннотация. Статья содержит результаты исследований по влияние обработки абразивным потоком на шероховатость и микротвердость поверхности малых каналов (отверстий) в образцах заготовок из стали 12Х18Н10Т. Получены эмпирические зависимости изменения шероховатости и микротвёрдости поверхности малого канала от степени наполнения рабочей среды пластификатором и давления сдвига гидравлической системы с экстремумами данных функций в исследуемой области. На основе этих зависимостей выбран состав рабочей среды: степень наполнения основы рабочей среды (при неизменном содержании белого электрокорунда – 30 %) пластификатором в виде алмазной пасты (АСН 60/40 ВОМ Г) Ка 40 % и каучука СКТ 30 % соответственно. В результате обработки абразивным потоком удалось уменьшить величину шероховатости поверхностного слоя с Ra = 0,49-0,62 мкм до Ra = 0,047-0,06 мкм, а также увеличить микротвёрдость поверхности от величины h = 188-192 HB до h = 213-220 HB. Величина упрочненного слоя pprox 7,24 мкм. Анализ профилограмм поверхности показывает, что в результате обработки абразивным потоком существенно уменьшились как высотные параметры шероховатости (средние – Ra, Rz, Rp; максимальные – Rmax), так и глубинные параметры шероховатости (Rk). При помощи электронной микроскопии (SEM MAG) проведена качественная оценка структуры поверхностного слоя малого канала. Полученные результаты показывают хорошую обрабатываемость абразивным потоком заготовок из аустенитных сталей, в частности стали 12Х18Н10Т.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, сталь 12X18H10T, шероховатость, микротвёрдость, малый канал.

# Effect of abrasive flow machining on the roughness and microhardness the small channels (holes) surface in samples of 12X18N10T steel workpieces

V. A. Levko<sup>\*</sup>, O. V. Litovka, A. E. Petetskaya, P. A. Ivanov, P. A. Snetkov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation \*E-mail: levko@sibsau.ru

Abstract. The article contains the results of research on the effect of abrasive flow machining on the roughness and microhardness of the surface of small channels (holes) in samples of workpieces made of 12X18N10T steel. Empirical dependences of the change in roughness and microhardness of the surface of a small channel on the degree of filling of the working medium with a plasticizer and the shear pressure of the hydraulic system with the extrema of these functions in the studied area are obtained. Based on these dependencies, the composition of the working environment was selected: the degree of filling of the working media base (with a constant content of white electro corundum -30 %) with a plasticizer in the form of diamond paste (ASN 60/40 VOM G) Ka 40 % and SKT rubber 30 %, respectively. As a result of abrasive flow machining, it was possible to reduce the roughness of the surface layer from Ra = 0.49...0.62 µm to  $Ra = 0.047...0.06 \ \mu m$ , and also to increase the microhardness of the surface from  $h = 188...192 \ HB$ to h = 213...220 HB. The thickness of the hardened layer is  $\approx 7.24$  µm. Analysis of surface profilograms shows that as a result of abrasive flow machining, both the height roughness parameters (average -Ra, Rz, *Rp; maximum – Rmax) and the depth roughness parameters (Rk) were significantly reduced. Using elec*tron microscopy (SEM MAG), a qualitative assessment of the structure of the surface layer of the small channel was carried out. The obtained results show good machinability by abrasive flow of austenitic steel blanks, in particular 12X18N10T steel.

Keywords: abrasive flow machining, 12X18N10T steel, roughness, microhardness, small channel.

## Введение

В настоящее время одной из проблем в производстве деталей из аустенитных сталей остается окончательная обработка внутренних поверхностей каналов (отверстий) с малой площадью поперечного сечения. Так, при оценке качества выполнения отверстия малого диаметра основными критериями являются точность, форма, наличие и размер конусности по глубине канала, шероховатость поверхности, наличие микротрещин, грата [1].

Для формообразования таких поверхностей широко применяют различные способы: резание (сверление) сверлами малого диаметра, лазерным и электронным лучом; электроэрозионную обработку; электрохимическую и ультразвуковую обработку; струйно-абразивную обработку и др., каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [2]. Одним из недостатков является невысокое качество поверхности таких каналов.

В машиностроении для уменьшения шероховатости и повышения микротвердости поверхностного слоя деталей из аустенитных сталей применяют такие отделочно-упрочняющие технологии, как ультразвуковое ударное упрочнение бойками [3] и шариками в вакууме [4], комплексное жидкостное [5] и плазменное азотирование [6], лазерное упрочнение [7], фрикционную [8], дробеструйную [9] и ионно-плазменную обработку [10]. Однако в случае обработки таких труднодоступных поверхностей, как отверстия и каналы малых поперечных сечений, вышеперечисленные технологии имеют целый ряд ограничений.

Для окончательной обработки малых отверстий и каналов все более широкое применение находит обработка абразивным потоком (abrasive flow machining (AFM)), при которой высоковязкий материал (рабочая среда), равномерно наполненный абразивными частицами, возвратно-поступательно перемещается поршнями рабочих цилиндров через обрабатываемую деталь. При таком течении среда копирует форму обрабатываемого канала, создавая сжимающее давление на обрабатываемую поверхность и осуществляя абразивный контакт [11].

Начиная с 80-х гг. прошлого века, метод AFM стал применяться для удаления дефектного слоя в отверстиях охлаждения лопаток и дисков, обработанных лазером или электроэрозионной обработкой, снятия заусенцев в отверстиях форсунок для распыления топлива и полирования литых поверхностей лопаток, колёс компрессора и рабочих колёс [12].

В настоящее время данная технология все чаще применяется для уменьшения шероховатости и повышения микротвердости закрытых каналов деталей из аустенитно-мартенситных сталей [13], в том числе полученных методом селективного лазерного сплавления [14].

Обработкой абразивным потоком внутренних каналов образцов из мартенситностареющей стали 300, полученных селективным лазерным сплавлением, удалось повысить усталостную

прочность на 26 %. Однако при уменьшении диаметра обрабатываемых отверстий до 3 мм и менее возникли проблемы с течением среды в этих отверстиях [15].

Эти проблемы связаны с высокой вязкостью рабочей среды традиционного состава. Известно, что для обработки таких отверстий в небольших по размеру деталях широко применяют метод micro AFM, в котором в качестве основы рабочей среды используют низкомолекулярные неньютоновские среды [16]. Однако применение технологии micro AFM относительно деталей из труднообрабатываемых сплавов ведет к снижению производительности обработки, так как низкомолекулярные среды слабо проявляют упругие свойства [17].

Добавление в высокомолекулярную среду алмазной пасты позволяет управлять вязкостью рабочей среды относительно геометрических характеристик обрабатываемого канала и осуществлять окончательную обработку двунаправленной AFM.

Цель работы – исследование влияния обработки абразивным потоком рабочей среды средней вязкости на шероховатость и микротвердость внутренней поверхности малых каналов образцов из аустенитной стали 12Х18Н10Т.

#### Методика проведения исследований

В результате предыдущих исследований процесса абразивно-экструзионной обработки малых отверстий экспериментально определен такой состав рабочий среды, при котором сохраняется возможность ее сдвигового течения в отверстии с малым поперечным сечением и максимальное по величине напряженно-деформированное состояние, позволяющее добиваться максимальной производительности обработки малых каналов в образцах из алюминиевого сплава АМг6. Состав среды (весовой): каучук СКТ – 40 %, алмазная паста – 60 %, дисперсность белого электрокорунда Ba = 40 - 63 мкм. Использована паста АСН 60/40 ВОМ Г – Ka = 28 %. Сдвигающее давление  $P_{\text{вх}} = 12$  МПа. Время обработки – 60 с. Обработка проведена на установке УЭШ-25 [17].

За методическую основу данных исследований была принята вышеописанная методика с учетом того, что полученные ранее зависимости шероховатости обработанного отверстия Ra монотонно убывают на всем исследуемом интервале, а величина удаленного слоя металла  $\Delta l$  при обработке монотонно возрастает, т. е. экстремумы не определены [17].

Для поиска экстремумов эмпирических зависимостей шероховатости *Ra* от состава рабочей среды и давления сдвига гидравлической системы *P*сд предложено расширить интервал варьирования параметров весового содержания компонентов рабочей среды.

Эксперименты проведены по плану Коно (m = 2, число повторений на одном уровне – 6). Варьируемые факторы: степень наполнения основы рабочей среды (при неизменном содержании белого электрокорунда – 30 %) пластификатором в виде алмазной пасты (ACH 60/40 BOM Г) Ka - 30, 40, 50 % и каучука CKT – 40, 30 и 20 % соответственно; давление сдвига гидравлической системы Pcg - 8, 10, 12 МПа. В качестве наполнителя использованы зерна нормального электрокорунда. Зернистость зерен Ba = 63 мкм определена по рекомендациям выбора вида и величины зерна наполнителя при обработке абразивным потоком [18]. Время обработки и величина сдвигающего давления остались такими же, как и в предыдущем исследовании. Для математической обработки произведено кодирование переменных  $x_1 = Ka$ ,  $x_2 = Ba$ ,  $y_1 = Ra$ ,  $y_2 = h$ .

Из свойств стали 12Х18Н10Т необходимо отметить следующие: плотность – 7,9 г/см<sup>3</sup>; модуль упругости (модуль Юнга) – 193 ГПа; предел прочности на растяжение – в отожженном состоянии около 520–680 МП, после термообработки до 900 МПа; предел текучести в отожженном состоянии 205 МПа, после упрочнения до 600 МПа; относительное удлинение после разрыва – 40–60 %; ударная вязкость – 600–1000 кДж/м<sup>2</sup>; твердость по Бринеллю – в отожженном состоянии 140–180 НВ, после термообработки до 300 НВ.

54 образца (рис. 1, *a*) выполнены из листового отожженного проката аустенитной стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632–2014). Малый канал *l* (рис. 1, *б*) получен фрезерованием концевой фрезой за один проход, реперная точка 2 предназначена для контроля величины съема металла по результатам обработки абразивным потоком.



Рис. 1. Образцы заготовок из стали 12Х18Н10Т с малыми каналами: *a* – набор из 54 образцов; *б* – единичный образец: *l* – малый канал; *2* – реперная точка

Fig. 1. Samples of 12X18N10T steel workpieces with small channels: a - set of 54 samples;  $\delta - \text{single sample}$ : l - small channel; 2 - reference point

Геометрические характеристики обрабатываемого канала длина  $L_k = 10$  мм, размеры сечения (ширина × высота) 2×0,625мм, площадь поперечного сечения  $S_{cev} = 1,25$  мм<sup>2</sup>. Форма, размер и угол входного и выходного сечения канала идентичны.

Исходная шероховатость поверхности образцов варьировалась в интервале Ra = 1,2-1,4 мкм, исходная шероховатость поверхности малого канала после фрезерования – Ra = 0,49-0,62 мкм.

Исходная микротвердость поверхности образцов варьировалась в интервале h = 175-179 HB. После фрезерования микротвердость поверхности малых каналов в образцах увеличилась и варьировалась в интервале h = 188-192 HB.

## Результаты исследования и их обсуждение

Результаты обработки абразивным потоком 54 образцов с малыми каналами в зависимости от факторов X1 и X2 приведены в табл. 1 и 2.

График зависимости изменения шероховатости поверхности малого канала в образце из стали 12X18H10T от степени наполнения рабочей среды пластификатором *Ka* (X1) и давлением сдвига гидравлической системы *P*сд (рис. 2, *a*) показывает наличие экстремумов эмпирических зависимостей в области 40 % наполнения рабочей среды пластификатором (алмазной пастой) для всего рассматриваемого интервала давлений сдвига.

Таблица 1

Шероховатость поверхности малых каналов после обработки абразивным потоком в зависимости от степени наполнения рабочей среды пластификатором и давлением сдвига гидравлической системы

Факторы		IIIepovopatocti Ra MVM							
Факторы		шероловатость ка, мкм							
								там <i>Ra</i> ,	
X1	X2	1	2	3	4	5	6	МКМ	
1	1	0,102	0,099	0,105	0,106	0,098	0,106	0,103	
-1	1	0,088	0,094	0,086	0,086	0,090	0,086	0,088	
1	-1	0,120	0,130	0,123	0,135	0,127	0,125	0,127	
-1	-1	0,099	0,095	0,095	0,101	0,105	0,105	0,100	
1	0	0,120	0,123	0,118	0,120	0,121	0,117	0,120	
-1	0	0,095	0,098	0,091	0,095	0,095	0,103	0,096	
0	1	0,047	0,050	0,050	0,048	0,048	0,049	0,049	
0	-1	0,065	0,067	0,069	0,070	0,065	0,065	0,067	
0	0	0,060	0,055	0,065	0,060	0,059	0,061	0,06	

#### Таблица 2

# Микротвёрдость поверхности малых каналов после обработки абразивным потоком в зависимости от степени наполнения рабочей среды пластификатором и давлением сдвига гидравлической системы

Факторы		Микротвёрдость <i>h</i> , НВ						
X1	X2	1	2	3	4	5	6	опытам
								<i>h</i> , HB
1	1	215	213	216	216	214	216	215
-1	1	212	211	210	213	213,00	213	212
1	-1	209	210	208	209	208	210	209
-1	-1	206	206	205	205	207	207	206
1	0	212	212	211	213	213	211	212
-1	0	209	207	210	210	209	209	209
0	1	220	221	218	221	220	220	220
0	-1	213	211	214	214	213	213	213
0	0	217	218	218	216	216	217	217





204

а – шероховатости; б – микротвердости

Fig. 2. Graph of the dependence of the small channel surface parameters in a 12X18N10T steel sample on the degree of filling of the working medium with plasticizer Ka (X1) and the shear pressure of the hydraulic system Psd (X2): a – roughness;  $\delta$  – microhardness При таких соотношениях регулируемых факторов X1 и X2 рабочая среда в обрабатываемом образце осуществляет сдвиговое течение с лучшими сочетаниями вязких и упругих свойств. Для показателя микротвердости (рис. 2, б) экстремум эмпирической зависимости также наблюдается для области 40 % наполнения рабочей среды пластификатором и максимальной величины давления сдвига.

В кодированном выражении эмпирическая зависимость шероховатости определена как

шероховатость: 
$$Y1 = 60,63 + 10,8X1 - 8,9X2 + 47,1X1^2 - 3,1X2^2 - 3,1X1X2.$$
 (1)

Статистические характеристики: максимальная дисперсия  $S^2max = 0,236$ ; дисперсия воспроизводимости среднего значения  $S^2(y) = 0,261$ ; дисперсия откликов первого рода  $S_1^2 = 293,99$ (отлична от нуля, так как  $S_1^2/S^2(y) = 1126,4 > F0,05(2;18) = 3,55$ ); дисперсия откликов второго рода  $S_2^2 = 148567$  (значительно отлична от нуля, так как  $S_2^2/S^2(y) = 569222 > F0,05$  (3;18) = = 5,09); остаточная дисперсия  $S^2$ ост = 1,389; значение критерия Фишера при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  равняется Fag = 1,389/1,564 = 0,89, что меньше 5,09. Полученное уравнение адекватно описывает экспериментальные данные.

Микротвёрдость: 
$$Y1 = 216,8 + 1,5X1 + 3,2X2 - 6,2X1^2 - 0,2X2^2$$
. (2)

Статистические характеристики: максимальная дисперсия  $S^2max = 1,333$ ; дисперсия воспроизводимости среднего значения  $S^2(y) = 0,16$ ; дисперсия откликов первого рода  $S_1^2 = 198,9$  (отлична от нуля, так как  $S_1^2/S^2(y) = 1243,1 > F0,05(2;18) = 3,55$ ); дисперсия откликов второго рода  $S_2^2 = 126601$  (значительно отлична от нуля, так как  $S_2^2/S^2(y) = 791256 > F0,05$  (3;18) = 5,09); остаточная дисперсия  $S^2$ ост = 0,148; значение критерия Фишера при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ равняется Fag = 0,148/1,564 = 0,09, что меньше 5,09. Полученное уравнение адекватно описывает экспериментальные данные.

По результатам исследования и полученных зависимостей (1) и (2) обработку абразивным потоком малых каналов в образцах из стали 12Х18Н10Т рекомендовано проводить с рабочей средой следующего состава: степень наполнения основы рабочей среды (при неизменном содержании белого электрокорунда – 30 %) пластификатором в виде алмазной пасты (АСН 60/40 ВОМ Г) *Ка* 40 % и каучука СКТ 30 % соответственно. Максимальное давление сдвига гидравлической системы *Р*сд 12 МПа ограничено техническими возможностями установки.

Дальнейшие исследования по качественной и количественной оценке изменения структуры поверхностного слоя были проведены на образцах, обработанных на условиях Ka(X1) = 40 % и Pcd(X2) = 12 МПа. Количественная оценка изменения шероховатости поверхностного слоя проведена на основе протоколов профилограмм (рис. 3), полученных на профилометре MarSurf M300. Сравнительная характеристика шероховатости поверхностного слоя малого канала представлена в табл. 3.

Сравнение двух полученных профилограмм показывает, что в результате обработки абразивным потоком существенно уменьшились как высотные параметры шероховатости (средние – *Ra*, *Rz*, *Rp*; максимальные – *R*max), так и глубинные параметры шероховатости (*Rk*).

Увеличение материальных составляющих Mr1 и Mr2 с 7 до 10 % и с 72 до 87 % соответственно показывает, что в ходе обработки присутствовали такие виды контакта, как микрорезание и пластическая деформация. Этот факт подтверждается возрастанием микротвёрдости поверхности канала после обработки абразивным потоком на 12–15 % (для рассматриваемых образцов с 189–191 до 213–220 HB).

Качественная оценка изменения состояния поверхностного слоя малых каналов образцов из сплава 12Х18Н10Т была проведена на основании изображений, полученных на оптическом микроскопе (рис. 4). При помощи электронной микроскопии (SEM MAG) получено изображение профиля поперечного сечения канала после AFM (рис. 5), структуры поверхностного слоя канала после фрезерования (рис. 6) и обработки абразивным потоком (рис. 7). Для исследования изменения структуры материала образца после обработки абразивным потоком исследован микрошлиф канала (рис. 8), разрезанного вдоль осевой линии.



Рис. 3. Профилограмма поверхности канала: *а* – после фрезерования; *б* – после обработки абразивным потоком

Fig. 3. Profile of the channel surface:  $a - after milling; \delta - after AFM$ 

Таблица 3

Сравнительная характеристика шероховатости поверхностного слоя малого канала после фрезерования и обработки абразивным потоком по протоколам профилограмм

	Численное значение		
Наименование нараметров шероховатости	параметров		
Панменование параметров шероховатости	после	после AFM	
	фрезерования		
Средняя арифметическая шероховатость, <i>Ra</i> , мкм	0,464	0,047	
Средняя высота неровности, <i>Rz</i> , мкм	1,954	0,345	
Максимальная высота шероховатости, Rmax, мкм	2,484	0,757	
Средняя высота выступов профиля, <i>Rp</i> , мкм	0,883	0,133	
Глубина шероховатости сердцевины, <i>Rk</i> , мкм	1,187	0,154	
Материальная составляющая определяется для линии разреза, которая	7	10	
отделяет выступающие пики от основного профиля шероховатости; Mr1, %			
Материальная составляющая определяется для линии разреза, которая	72	87	
отделяет глубокие впадины от основного профиля шероховатости; Mr2, %			

Для структуры поверхности образцов в исходном состоянии (рис. 4, a) характерны следы проката в продольном направлении, образующие регулярную шероховатость. На поверхности также видны царапины от механического воздействия при перемещении образцов и их формообразования. После фрезерования структура поверхности малого канала (рис. 4,  $\delta$ ) претерпела ряд изменений. Она представлена комплексом параллельных царапин и впадин следа фрезы, которые подтверждаются протоколом профилограммы поверхности (см. рис. 3, a).

В целом поверхность малого канала соответствует типовой структуре поверхности деталей из стали 12Х18Н10Т после фрезерной обработки.

После обработки абразивным потоком направление шероховатости поверхности не изменилось (рис. 4, e), но глубина царапин существенно уменьшилась. Микронеровности следа от фрезы полностью удалены. Это подтверждено протоколом профилограммы (см. рис. 3,  $\delta$ ), а также уменьшением показателей Rmax с 2,484 до 0,757 мкм, Rp с 0,883 до 0,133 мкм и Rk с 1,187 до 0,154 мкм.

Увеличение с 72 до 87 % материальной составляющей для линии разреза, отделяющей глубокие впадины от основного профиля шероховатости, позволяет сделать вывод о том, что

дефектные слои от предшествующих операций проката и фрезерования полностью удалены. Увеличение материальной составляющей для линии разреза, отделяющей выступающие пики от основного профиля шероховатости, с 7 до 10 % также свидетельствует о выравнивании структуры микронеровностей поверхностного слоя.

После обработки абразивным потоком была получена равномерная структура поверхностного слоя. При этом величина шероховатости была уменьшена с Ra = 0,49-0,62 мкм до Ra = 0,047-0,06 мкм. Микротвёрдость поверхности в результате AFM увеличилась от величины h = 188-192 HB до h = 213-220 HB.

В целом в структуре поверхности наблюдается слоистость материала и наличие микровключений, характерных для основного слоя материала образца на микрошлифах (рис. 8).

Форма поперечного сечения малого канала соответствует профилю концевой фрезы. Анализ геометрического контура профиля выходной кромки поперечного сечения канала после AFM (рис. 5) показывает равномерность обработки всего профиля в пределах заданных допусков на обработку.

Изображение поверхностного слоя канала после фрезерования (рис. 6) также показывает наличие ряда микронеровностей разной высоты и длины.





б



в

Рис. 4. Структура поверхности канала: *а* – поверхность образца до формообразования канала; *б* – после фрезерования; *в* – после 60 с обработки абразивным потоком

> Fig. 4. Structure of the channel surface: a – sample surface before channel formation;  $\delta$  – after milling; e – after 60 seconds of AFM



Рис. 5. Геометрический контур профиля поперечного сечения канала после AFM (142 х)

Fig. 5. Geometrical contour of the channel cross-section profile after AFM (142 x)

Структура поверхностного слоя канала после обработки абразивным потоком, полученная при помощи электронной микроскопии (SEM MAG) (рис. 7), показывает наличие упрочненного слоя. Изображение с увеличением 710 х (рис. 7, *a*) показывает относительную равномерность этого слоя относительно всей поверхности канала, а изображение с увеличением 4,33 kx (рис. 7,  $\delta$ ) дало возможность установить толщину упрочненного слоя  $\approx$  7,24 мкм. Топография обработанной поверхности (рис. 7) также демонстрирует увеличение материальных составляющих *Mr*1 и *Mr*2.



Рис. 6. Структура поверхностного слоя канала после фрезерования (708х)

Fig. 6. Structure of the surface layer of the channel after milling (708x)



Рис. 7. Структура поверхностного слоя канала после обработки абразивным потоком: a – увеличение 710 х;  $\delta$  – увеличение 4,33 kx

Fig. 7. Structure of the surface layer of the channel after AFM: a – magnification 710 x; b – magnification 4.33 kx Микрошлиф образца (рис. 8), демонстрирующий структуру его материала, также подтверждает увеличение микротвёрдости поверхностного слоя. Так, основной материал имеет слоистую структуру зоны *1*, характерную для стали 12Х18Н10Т. В поверхностном слое зоны *2* толщины слоев уменьшаются, что свидетельствует об их деформации. Область *3* соответствует радиусу скругления боковой стенки канала.



Рис. 8. Структура материала образца, разрезанного вдоль осевой линии канала (микрошлиф): *a* – увеличение 1,52 kx; *б* – увеличение 3,81 kx

Fig. 8. Structure of the sample material cut along the channel centerline after AFM (microsection) of the channel surface cut: a – magnification 1.52 kx; b – magnification 3.81 kx

Таким образом, в результате обработки абразивным потоком рабочей среды установленного состава за один этап удалось обеспечить существенное уменьшение шероховатости поверхностного слоя малого канала и увеличить его микротвёрдость. Это показывает хорошую обрабатываемость стали 12Х18Н10Т в отличие от сталей аустенитно-мартенситного типа и сплавов порошкового молибдена, обработка которых проводилась в два этапа [13; 19].

#### Заключение

В результате исследований зависимости изменения шероховатости и микротвёрдости поверхности малого канала в образце из стали 12Х18Н10Т от степени наполнения рабочей среды пластификатором и давления сдвига гидравлической системы получены эмпирические зависимости с экстремумами данных функций в исследуемой области.

Это позволило рекомендовать обработку абразивным потоком рабочей среды следующего состава: степень наполнения основы рабочей среды (при неизменном содержании белого электрокорунда – 30 %) пластификатором в виде алмазной пасты (АСН 60/40 ВОМ Г) Ка 40 % и каучука СКТ 30 % соответственно.

В результате обработки абразивным потоком удалось уменьшить величину шероховатости поверхностного слоя с Ra = 0,49-0,62 мкм до Ra = 0,047-0,06 мкм, а также увеличить микротвёрдость поверхности от величины h = 188-192 НВ до h = 213-220 НВ. Величина упрочненного слоя  $\approx$  7,24 мкм. Анализ профилограмм поверхности показывает, что в результате обработки абразивным потоком существенно уменьшились как высотные параметры шероховатости (средние – *Ra*, *Rz*, *Rp*; максимальные – *Rmax*), так и глубинные параметры шероховатости (*Rk*).

Полученные результаты показывают хорошую обрабатываемость абразивным потоком заготовок из стали 12X18H10T.

### Библиографические ссылки

1. Широкожухова А. А., Юхневич С. С. Комбинированные методы обработки при изготовлении отверстий малого диаметра // Перспективы развития двигателестроения : материалы междунар. науч.-технич. конф. им. Н. Д. Кузнецова, Самара, 21–23 июня 2023 года / Самар. нац. исслед. ун-т им. ак. С. П. Королева. Т. 1. Самара, 2023. С. 339–341.

2. Бойцов А. Г. Современные технологии обработки отверстий малого диаметра // РИТМ машиностроения. 2020. № 5. С. 22 [Электронный ресурс]. URL: https://ritm-magazine.com/ru/ public/sovremennye-tehnologii-obrabotki-otverstiy-malogo-diametra.

3. Mordyuk B. N., Prokopenko G. I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management // Journal of Sound and Vibration. 2007. Vol. 308, Iss. 3–5. P. 855–866. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.03.054.

4. Sun Y. Sliding wear behavior of surface mechanical attrition treated AISI 304 stainless steel // Tribology International. 2013. Vol. 57. P. 67–75. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.07.015.

5. Advance Complex Liquid Nitriding of Stainless Steel AISI 321 Surface at 430 °C / Y. Lin, J. Wang, D. Zeng, R. Huang, H. Fan // Journal of Materials Engineering and Performance. 2013. Vol. 22, No. 9. P. 2567–2573. DOI: 10.1007/s11665-013-0545-8.

6. Effect of nanostructured grains on martensite formation during plasma nitriding of AISI 321 austenitic stainless steel / M. Golzar Shahri, M. Salehi, S. R. Hosseini, M. Naderi // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 310. P. 231–238. DOI:10.1016/j.surfcoat.2016.12.019.

7. Laser Surface Hardening of Austenitic Stainless Steel / S. M. Levcovici, D. T. Levcovici, V. Munteanu et al. // Journal of Materials Engineering and Performance. 2000. Vol. 9, No. 5. P. 536–540. DOI: 10.1361/105994900770345665.

8. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12Х18Н10Т наноструктурирующей фрикционной обработкой / А. В. Макаров, П. А. Скорынина, А. Л. Осинцева и др. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. № 4(69). С. 80–92. DOI 10.17212/1994-6309-2015-4-80-92.

9. Influence of peening on corrosion properties of AISI 304 stainless steel / H. Lee, D. Kim, J. Jung, Y. Pyoun, K. Shin // Corrosion science. 2009. Vol. 51, Iss. 12. P. 2826–2830.

10. Загибалова Е. А., Москвина В. А., Майер Г. Г. Влияние метода и температуры ионноплазменной обработки на физико-механические свойства поверхностных слоев в аустенитной нержавеющей стали // Frontier Materials & Technologies. 2021. № 4. С. 17–26. DOI 10.18323/ 2782-4039-2021-4-17-26.

11. McCarty R. W. Method of honing by extruding. Patent US, no. 3521412, 1970 (Publ. 21.07.1970).

12. Rhoades L. J. Abrasive flow machining for automatic surface finishing and capacitance technology for in-process surface and dimensional metrology // Surface Engineering. Dordrecht: Springer, 1990. P. 456–467. DOI: 10.1007/978-94-009-0773-7 46.

13. Обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей среды образцов литых заготовок из аустенитно-мартенситной стали / В. А. Левко, Н. С. Теряев, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Вестник Самарского ун-та. Аэрокосмич. техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 3. С. 122-132. DOI 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132.

14. Manufacturing of Closed Impeller for Mechanically Pump Fluid Loop Systems Using Selective Laser Melting Additive Manufacturing Technology / A. Adiaconitei, I. S. Vintila, R. Mihalache et al. // Materials. 2021. No. 14. P. 5908. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14205908.

15. Effect of abrasive flow machining (AFM) finish of selective laser melting (SLM) internal channels on fatigue performance / Sangil Han, Ferdinando Salvatore, Joël Rech et al. // Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 59. P. 248–257. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmapro. 2020.09.065.

16. Greenslet J. M., Rhoades L. J. Method and apparatus for measuring flow rate through and polishing a workpiece orifice. Patent US, no 6953387, 2004 (Publ. 11.10.2005).

17. Левко В. А., Левко А. А. Исследование процесса абразивно-экструзионной обработки малых отверстий // Вестник СибГАУ. 2011. № 4(37). С. 169–173.

18. Иванов П. А., Левко В. А. Выбор вида и величины зерна наполнителя при обработке абразивным потоком прямоугольных заготовок из цветных сплавов // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 2. С. 6–13. DOI 10.22213/2413-1172-2022-2-6-13.

19. Левко В. А., Савин Д. И., Литовка О. В. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена // Вестник Иркут. гос. технич. ун-та. 2020. Т. 24, № 1(150). С. 36–51. DOI 10.21285/1814-3520-2020-1-36-51.

#### References

1. Shirokozhukhova A. A., Yukhnevich S. S. [Combined processing methods in the small diameter holes manufacture]. *Perspektivy razvitiya dvigatelestroyeniya : materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii imeni N. D. Kuznetsova* [Prospects for the Development of Engine Building: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference named after N. D. Kuznetsov]. Samara, 2023, Vol. 1. P. 339–341 (In Russ.).

2. Boytsov A. G. [Modern technologies for processing small diameter holes]. *RITM mashinostroyeniya*. 2020. No. 5. P. 22 (In Russ.). Available at: https://ritm-magazine.com/ru/public/ sovremennye-tehnologii-obrabotki-otverstiy-malogo-diametra.

3. Mordyuk B. N., Prokopenko G. I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management. *Journal of Sound and Vibration*. 2007, Vol. 308, Iss. 3–5, P. 855–866. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.03.054.

4. Sun Y. Sliding wear behavior of surface mechanical attrition treated AISI 304 stainless steel. *Tribology International.* 2013, Vol. 57, P. 67–75. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.07.015.

5. Lin Y., Wang J., Zeng D., Huang R., Fan H. Advance Complex Liquid Nitriding of Stainless Steel AISI 321 Surface at 430 °C. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013,Vol. 22, No. 9, P. 2567–2573. DOI: 10.1007/s11665-013-0545-8.

6. Golzar Shahri M., Salehi M., Hosseini S. R., Naderi M. Effect of nanostructured grains on martensite formation during plasma nitriding of AISI 321 austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2017, Vol. 310, P. 231–238. DOI:10.1016/j.surfcoat.2016.12.019.

7. Levcovici S. M., Levcovici D. T., Munteanu V. et al. Laser Surface Hardening of Austenitic Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2000, Vol. 9, No. 5, P. 536–540. DOI: 10.1361/105994900770345665.

8. Makarov A. V., Skorynina P. A., Osintseva A. L., Yurovskikh A. S., Savrai R. A. [Improving the tribological properties of austenitic 12Kh18N10T steel by nanostructuring frictional treatment]. *Obrabotka metallov.* 2015, Vol. 69, No. 4, P. 80–92 (In Russ.).

9. Influence of peening on corrosion properties of AISI 304 stainless steel / H. Lee, D. Kim, J. Jung, Y. Pyoun, K. Shin. *Corrosion science*. 2009, Vol. 51, Iss. 12, P. 2826–2830.

10. Zagibalova E. A., Moskvina V. A., Mayer G. G. The influence of method and temperature of ionplasma treatment on physical and mechanical properties of surface layers in austenitic stainless steel. *Frontier Materials & Technologies*. 2021, No. 4, P. 17–26. DOI: 10.18323/2782-4039-2021-4-17-26.

11. McCarty R. W. Method of honing by extruding. Patent US, no. 3521412, 1970.

12. Rhoades L. J. Abrasive flow machining for automatic surface finishing and capacitance technology for in-process surface and dimensional metrology. *Surface Engineering*. Dordrecht: Springer, 1990, P. 456–467. DOI: 10.1007/978-94-009-0773-7\_46.

13. Levko V. A., Teryaev N. S., Litovka O. V., Ivanov P. A. Abrasive flow machining of specimens of cast billets from austenomartensitic steel with high-viscosity media. *Vestnik of Samara Uni-*

*versity. Aerospace and Mechanical Engineering.* 2023, Vol. 22, No. 3, P. 122–132. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132.

14. Adiaconitei A., Vintila I. S., Mihalache R. et al. Manufacturing of Closed Impeller for Mechanically Pump Fluid Loop Systems Using Selective Laser Melting Additive Manufacturing Technology. *Materials*. 2021, No. 14, P. 5908. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14205908.

15. Sangil Han, Ferdinando Salvatore, Joël Rech et al. Effect of abrasive flow machining (AFM) finish of selective laser melting (SLM) internal channels on fatigue performance. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020, Vol. 59, P. 248–257. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.065.

16. Greenslet J. M., Rhoades L. J. Method and apparatus for measuring flow rate through and polishing a workpiece orifice. Patent US, no 6953387, 2004.

17. Levko V. A., Levko A. A. [Study of the process of abrasive extrusion machining of small holes] *Vestnik SibGAU*. 2011, Vol. 37, No. 4, P. 169–173 (In Russ.).

18. Ivanov P. A., Levko V. A. [Type and Size Filler Grain Selection During Abrasive Flow Machining of Non-Ferrous Alloys Rectangular Parts]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2022, Vol. 25, No. 2, P. 6–13 (In Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-6-13.

19. Levko V. A., Savin D. I., Litovka O. V. Powder molybdenum alloy workpieces contact interactions under abrasive flow machining by high viscosity media. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*. 2020, Vol. 24, No. 1(150), P. 36–51 (In Russ.). DOI 10.21285/1814-3520-2020-1-36-51.

© Левко В. А., Литовка О. В., Петецкая А. Е., Иванов П. А., Снетков П. А., 2024

Левко Валерий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: levko@sibsau.ru. https://orcid.org/0009-0001-0209-9927

Литовка Ольга Владимировна – ассистент кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: litovka.9518@gmail.com.

**Петецкая Ангелина Евгеньевна** – аспирант кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: petetskaya\_ae@sibsau.ru.

**Иванов Павел Андреевич** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ivanov.pasch.iva@yandex.ru.

Снетков Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: snetkov@list.ru.

Levko Valery Anatolyevich – Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: levko@sibsau.ru. https://orcid.org/0009-0001-0209-9927

Litovka Olga Vladimirovna – assistant of the Department of Mechanical Engineering Technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: litovka.9518@gmail.com.

**Petetskaya Angelina Evgenievna** – postgraduate student of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: petetskaya\_ae@sibsau.ru.

Ivanov Pavel Andreevich – Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ivanov.pasch.iva@yandex.ru.

**Snetkov Pavel Alekseevich** – Cand. Sc. (Technical), associate professor, associate professor of the department of mechanical engineering technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: snetkov@list.ru.

Статья поступила в редакцию 02.11.2024; принята к публикации 25.11.2024; опубликована 11.04.2025 The article was submitted 02.11.2024; accepted for publication 25.11.2024; published 11.04.2025

> Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 The article can be used under the Creative Commons Attribution 4.0 License