

Игнатова А.М., Балабанов С.К., Игнатов М.Н. Исследование зонированности поверхности гидроабразивного реза конструкционной стали обыкновенного качества методом анализа изображений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 83–90. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.12

Ignatova A.M., Balabanov S.K., Ignatov M.N. Investigation of the zoning of a waterjet cut's surface on structural steel of ordinary quality by the method of image analysis. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 83–90. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.12

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 1, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.12
УДК 621.9.048.3

А.М. Игнатова, С.К. Балабанов, М.Н. Игнатов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНИРОВАННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗА
КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ОБЫКНОВЕННОГО КАЧЕСТВА
МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Проблемой практики гидроабразивной обработки является обеспечение надлежащего качества поверхности реза. Получить информацию о состоянии поверхности возможно не только контактным методом, но и методом анализа изображений. Настоящее исследование преследует цель оценить возможности применения анализа изображений к задачам оценки параметров шероховатости поверхности реза, качества поверхности и цены изготовления при гидроабразивной резке. Для исследования зонированности реза был составлен алгоритм проведения. Для определения шероховатости поверхности реза контактным способом использовался профилометр. Для проведения анализа изображений поверхности реза использовался программный продукт ImageJ. В качестве объектов исследования использовались образцы резов на Ст3, полученные гидроабразивной резкой при скоростях подачи абразива 256,24; 170,02; 106,66; 76,62; 59,28 м/с. При сопоставлении данных о шероховатости поверхности, полученных при анализе изображений и контактным способом с использованием критерия Стьюдента, не выявлено статистически значимых различий. Для достижения максимальной точности измерений по изображению следует проводить соответствующую калибровку средства анализа изображений. Преимущества метода анализа изображений в оценке состояния поверхности реза следующие: возможность выявления особенностей неровностей, формирующих рельеф, в зависимости от данного параметра по показателям коэффициента сферичности, площади, а также количеству на единицу площади, а также возможность получения наглядной трехмерной визуализации. Трехмерная визуализация позволяет информировать заказчика работ о состоянии поверхности реза при различных условиях его получения, позволяет быстро сформулировать представление о качестве результата и тем самым оптимизировать процедуру выбора скоростей обработки с соблюдением баланса экономических и технических запросов заказчика.

Ключевые слова: гидроабразивная резка, анализ изображений, трехмерная реконструкция, шероховатость, топография, механическая обработка, конструкционная сталь, профилометр, рельеф, морфология, статистический анализ.

A.M. Ignatova, S.K. Balabanov, M.N. Ignatov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**INVESTIGATION OF THE ZONING OF A WATERJET CUT'S SURFACE ON STRUCTURAL STEEL
OF ORDINARY QUALITY BY THE METHOD OF IMAGE ANALYSIS**

The problem with the practice of waterjet processing is to ensure the proper quality of the surface of the cut. A method that allows you to interpret information with the state of the surface is possible not only with contact methods, but also with the method of image analysis. The present study aims to assess the possibilities of applying image analysis to the problems of estimating the parameters of the roughness of the surface of a cut, surface quality and the cost of manufacturing under waterjet cutting. To investigate the zoning of the cut, an algorithm was developed for its carrying out. To determine the roughness of the surface of the cut, a profilometer was used to contact the method. ImageJ software was used to analyze the surface images of the cut. As the objects of the study, specimens of cuts were used on structural steel, obtained by hydroabrasive cutting at abrasive feed rates of 256.24; 170.02; 106.66; 76.62; 59.28 m/s. When comparing the surface roughness data obtained in the analysis of images and the contact method using the Student's test, no statistically significant differences were found. To achieve the maximum accuracy of image measurements, an appropriate calibration of the image analysis tool should be carried out. Advantages of the image analysis method in assessing the state of the surface of a cut are the ability to identify features of irregularities that form the relief from the sphericity factor, area, and quantity per unit area, as well as the possibility of obtaining visual three-dimensional visualization. Three-dimensional visualization allows the customer to inform the customer about the state of the surface of the cut under different conditions of its receipt, allows you to quickly formulate an idea of the quality of the result and thereby optimize the procedure for selecting processing speeds in accordance with the balance of economic and technical customer requests.

Keywords: waterjet cutting, image analysis, three-dimensional reconstruction, roughness, topography, machining, structural steel, profilometry, relief, morphology, statistical analysis.

Гидроабразивная обработка предполагает локализованное воздействие на материал высокоскоростным потоком смеси воды и абразива – гидроабразивной струей. Воздействие на материал происходит за счет ударного воздействия абразивных частиц, которое вызывает эрозию и микромеханическое разрушение под действием быстроизменяющегося поля местных напряжений [1].

Преимущества метода гидроабразивной резки, по сравнению с традиционными, представлены в многочисленных публикациях [2–7]. Отмечается [8], что гидроабразивная резка способна стать альтернативой некоторых современных методов резания, таких как лазерная резка.

Проблемой практики гидроабразивной обработки является обеспечение надлежащего качества поверхности реза. Закономерности, описывающие параметры шероховатости поверхности реза от технологических параметров, также представлены в отечественной и зарубежной научной периодике [9–12]. Авторы исследований рассматривают взаимосвязь параметров поверхности реза с характеристиками абразива, скоростью его подачи, а также с параметрами самого материала, подвергающегося резке. Отдельная категория публикаций посвящена математическим моделям [13, 14], позволяющим прогнозировать качество реза и назначать оптимальные режимы обработки материалов при помощи гидроабразивной резки.

Закономерности, описывающие общую зонированность поверхности реза, являются важными для назначения финишных операций по обработке изделий, и потому такие исследования являются актуальными.

В настоящее время получить информацию о состоянии поверхности возможно не только контактным методом, но и методом анализа изображений. Настоящее исследование преследует цель оценить возможности применения анализа изображений к задачам оценки параметров шероховатости поверхности реза, качества поверхности и цены изготовления при гидроабразивной резке.

Известно, что поверхность реза при гидроабразивной резке имеет особенности строения [15, 16], которые заключаются в том, что рельеф шероховатости по мере продвижения струи вдоль и поперек реза имеет заметно выраженную разницу в величине шероховатости и в упорядоченности неровностей, формирующих рельеф. На рис. 1 представлена схема типичной поверхности реза при гидроабразивной резке, на которой обозначена зонированность поверхности на зоны с низкой шероховатостью и относительно равномерным распределением неровностей по поверхности реза (зоны на ходе струи и фронты обработки) и зону с выраженными дугообразными бороздами, расположенными на определенном расстоянии друг от друга.

Для исследования зонированности реза был составлен алгоритм его проведения (рис. 2).

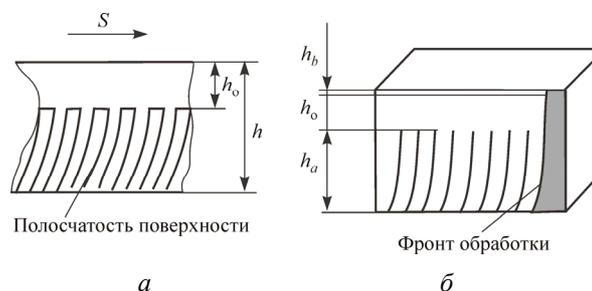


Рис. 1. Схема поверхности реза при гидроабразивной резке: а – расположение гладкой и полосчатой поверхностей; б – расположение фронтов обработки

Для определения шероховатости поверхности реза контактным способом использовался профилометр ОАО «Калибр» мод. 170623 в соответствии с ГОСТ 19300–86 «Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры». Для проведения анализа изображений поверхности реза использовался программный продукт ImageJ и его приложения SurfCharJ и Shape_Descriptor1u (после соответствующего калибрования), для математической обработки результатов использовались Excel

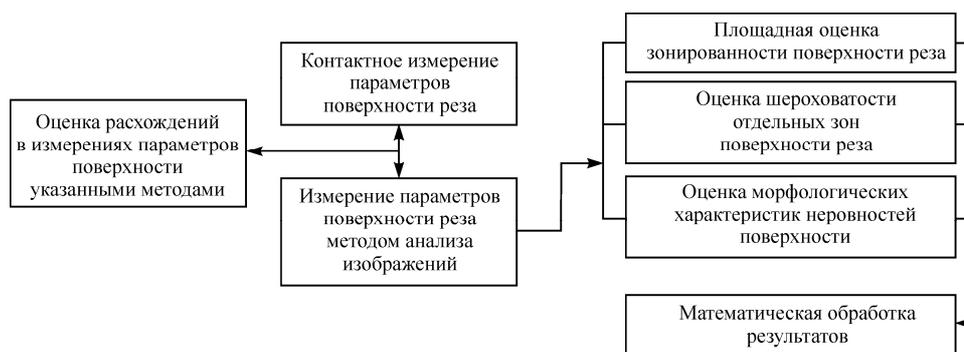


Рис. 2. Алгоритм исследования зонированности поверхности реза

и STATISTICA. В качестве объектов исследования использовались образцы резов на Ст3, полученные гидроабразивной резкой при скоростях подачи абразива 256,24; 170,02; 106,66; 76,62; 59,28 м/с.

На поверхности реза были выявлены три характерные горизонтальные зоны, условно обозначенные как гладкая (рис. 3, зона 1), переходная (см. рис. 3, зона 2) и текстурированная (см. рис. 3, зона 3). Каждая из горизонтальных зон была разделена на отдельные участки (см. рис. 3) для возможности выделения средних значений. Результаты контактных измерений шероховатости поверхности трех горизонтальных зон, полученных при

разных скоростях реза, представлены в табл. 1 и на рис. 4. Измерение параметров шероховатости поверхности отдельных участков производилось методом анализа изображений. Результаты представлены в табл. 2. При сопоставлении данных о шероховатости поверхности, полученных при анализе изображений и контактным способом с использованием критерия Стьюдента, не выявлено статистически значимых различий. Площадные соотношения этих зон, а также доли площадей фронтов обработки относительно общей площади поверхности реза были определены методом анализа изображений и представлены в табл. 3.



Рис. 3. Зонированность исследуемых поверхностей реза

Таблица 1

Результаты измерений параметров шероховатости поверхности реза контактным методом

Скорость перемещения струи вдоль реза, м/с	Зона 1			Зона 2			Зона 3		
	Ra, мкм	Rp, мкм	Rv, мкм	Ra, мкм	Rp, мкм	Rv, мкм	Ra, мкм	Rp, мкм	Rv, мкм
256,24	4,16	17,3	21,1	7,06	19,9	32,2	30,21	134,0	96,9
170,02	4,23	15,2	27,0	4,89	18,2	21,4	13,50	34,1	43,6
106,66	3,94	13,4	16,2	5,07	18,9	20,9	7,82	23,5	27,3
76,62	3,35	10,2	16,5	4,53	18,8	23,4	6,38	22,7	22,9
59,28	3,12	12,7	16,0	4,50	19,3	22,2	4,27	13,7	17,5

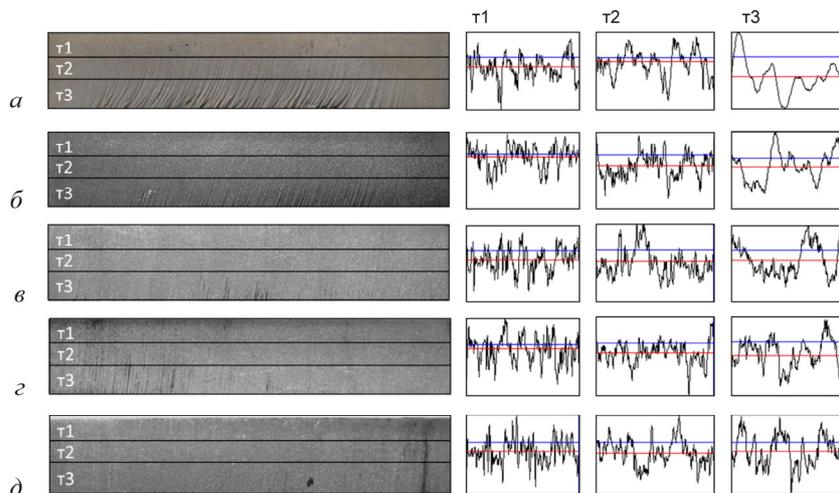


Рис. 4. Внешний вид поверхности образцов и результаты контактных измерений параметров шероховатости поверхности при разных скоростях перемещения струи вдоль реза, м/с: а – 256,24; б – 170,02; в – 106,66; г – 76,62; д – 59,28

Таблица 2

Результаты измерений параметров шероховатости поверхности реза методом анализа изображений

Скорость перемещения струи вдоль реза, м/с	Зона 1			Зона 2			Зона 3		
	Ra, мкм	Rp, мкм	Rv, мкм	Ra, мкм	Rp, мкм	Rv, мкм	Ra, мкм	Rp, мкм	Rv, мкм
256,24	4,24	17,6	22,5	7,20	45,3	32,8	31,40	189,7	105,7
170,02	4,69	16,5	27,5	6,69	18,6	21,8	18,54	34,8	54,4
106,66	4,20	13,7	18,9	5,17	22,5	21,3	7,98	31,0	27,8
76,62	3,90	11,4	16,8	4,62	19,2	34,2	5,24	23,2	23,4
59,28	3,18	13,0	16,3	4,59	19,7	22,6	4,36	14,0	17,9

Таблица 3

Площадная оценка зонированности поверхности реза по данным анализа изображений

Доля площади зоны в общей площади поверхности реза, %	Скорость перемещения струи вдоль реза, м/с				
	256,24	170,02	106,66	76,62	59,28
Зона 1	24,0	37,5	51,0	64,5	78,0
Зона 2	32,5	28,9	24,9	21,6	18,0
Зона 3	44,5	33,6	22,8	11,9	1,1
Общая площадь фронтов обработки, %	12,2	18,6	19,53	16,9	10,2

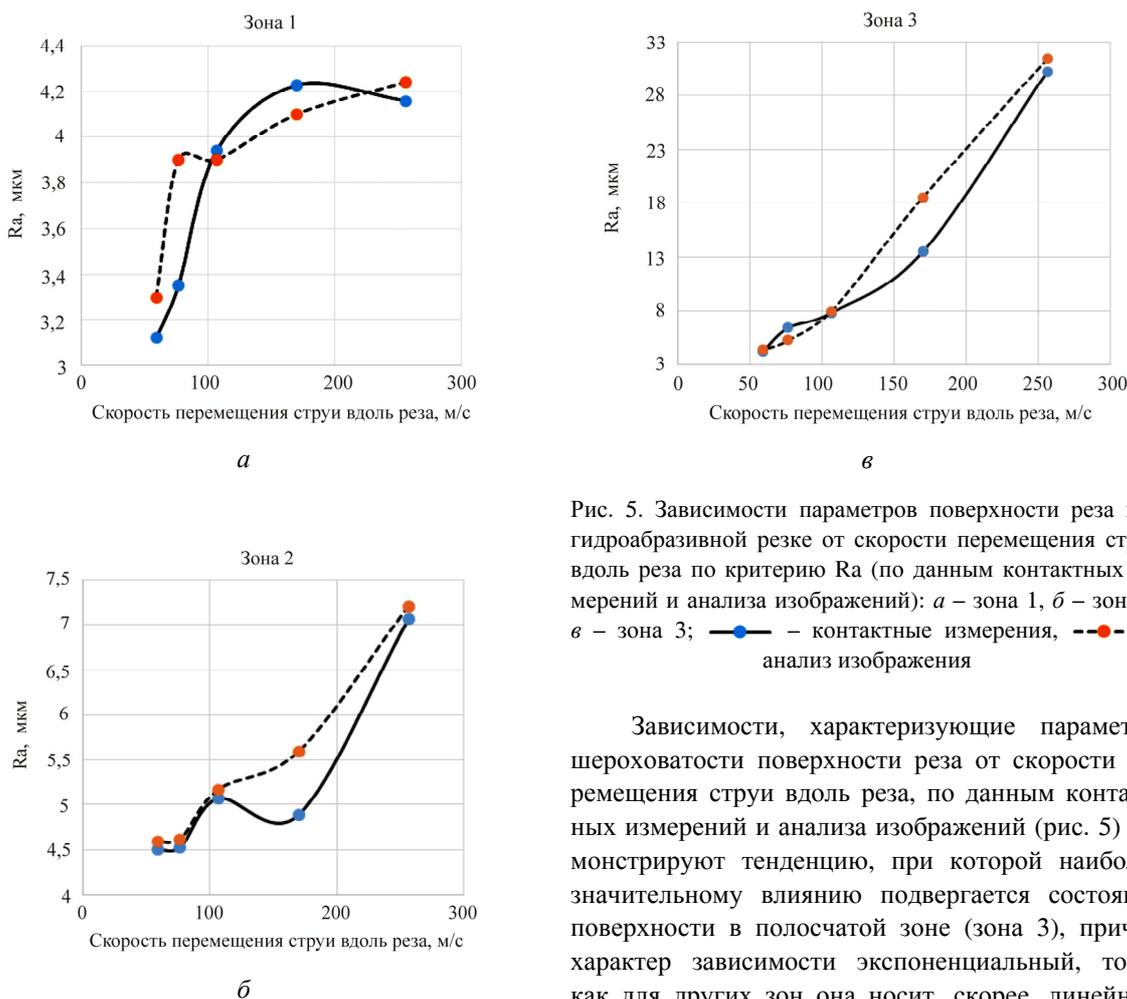


Рис. 5. Зависимости параметров поверхности реза при гидроабразивной резке от скорости перемещения струи вдоль реза по критерию Ra (по данным контактных измерений и анализа изображений): а – зона 1, б – зона 2, в – зона 3; —●— — контактные измерения, - -●- - анализ изображения

Зависимости, характеризующие параметры шероховатости поверхности реза от скорости перемещения струи вдоль реза, по данным контактных измерений и анализа изображений (рис. 5) демонстрируют тенденцию, при которой наиболее значительному влиянию подвергается состояние поверхности в полосчатой зоне (зона 3), причем характер зависимости экспоненциальный, тогда как для других зон она носит, скорее, линейный характер.

Кроме того, обнаруживается, что при минимальном значении скорости перемещения струи вдоль реза не может быть выделена переходная зона по параметру Ra. При этом, рассматривая отношение значений максимальных впадин и выступов рельефа (R_p/R_v) как характеристику текстурности поверхности (рис. 6), отметим, что при максимальных скоростях переходная зона обладает наиболее выраженной текстурностью, чем плоская и полосчатая, зонированность поверхности при этом остается, несмотря на общее улучшение показателей шероховатости, т.е. текстурности поверхности, наиболее показательной при оценке зонированности поверхности реза.

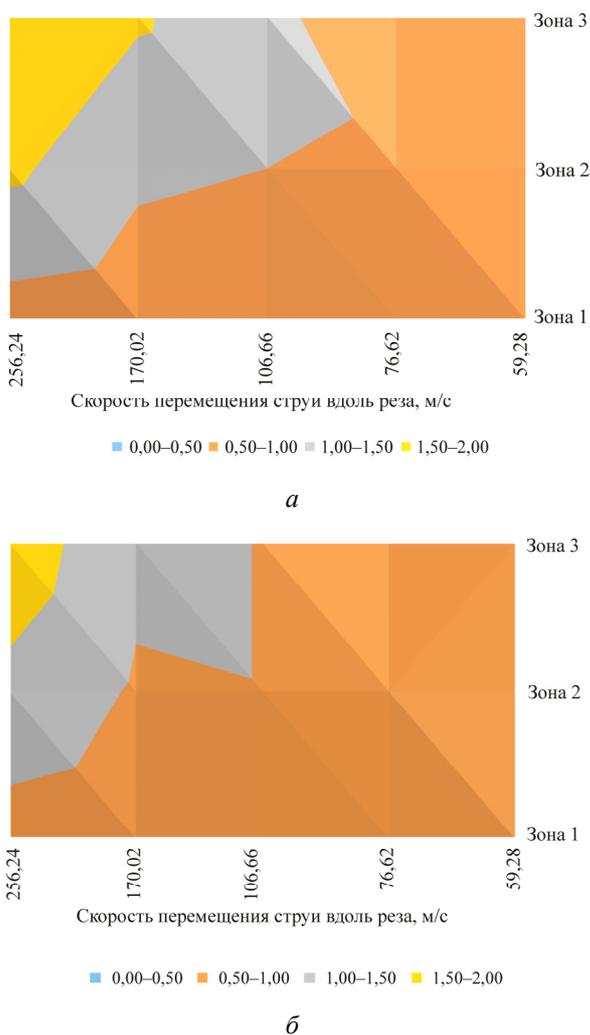


Рис. 6. Зависимость параметров поверхности реза при гидроабразивной резке от скорости перемещения струи вдоль реза по критерию текстурности R_p/R_v : *a* – по данным контактных измерений; *б* – по анализу изображений

Площадная оценка (рис. 7) показывает, что, несмотря на очевидную линейную тенденцию к сокращению доли переходной и полосчатых зон, зонированность как таковая остается, при этом до-

ля фронта обработки мало изменяется в зависимости от скорости перемещения струи вдоль реза.

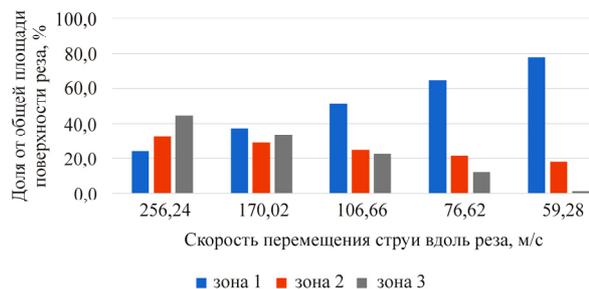


Рис. 7. Соотношение площадей различных зон поверхности реза при разных скоростях перемещения струи вдоль реза

Зонированность поверхности реза методом анализа изображений может быть интерпретировано визуально, результаты представлены в виде трехмерных реконструкций (рис. 8).

Методом анализа изображений получены численные характеристики морфологии неровностей поверхности реза. Установлены зависимости коэффициента сферичности неровностей, среднего показателя приведенного диаметра и количества неровностей на квадратный сантиметр поверхности от скорости перемещения струи вдоль реза в разных зонах поверхности реза (рис. 9).

Анализ зависимостей позволяет установить особенности морфологии неровностей. В гладкой зоне сферичность неровностей последовательно повышается, а величина диаметра уменьшается. Однако эта тенденция не сохраняется в других зонах. В переходной зоне коэффициент сферичности в среднем остается без изменений, что объясняется наличием неровностей различной формы: присутствуют неровности как в виде борозд, так и в виде бугров, хотя в целом тенденция к уменьшению диаметра остается. В наиболее текстурной полосчатой зоне коэффициент сферичности остается без значительных колебаний, уменьшается диаметр, что объясняется утонением неровностей и уменьшением их длины, что, соответственно, отражается и на количестве неровностей на единицу площади поверхности.

Таким образом, по результатам исследования зонированности поверхности реза при гидроабразивной резке установлено, что метод анализа изображений может использоваться в исследованиях зонированности поверхности и при оценке параметров его шероховатости. При этом для достижения максимальной точности измерений по изображению следует проводить соответствующую калибровку средства анализа изображений. В настоя-

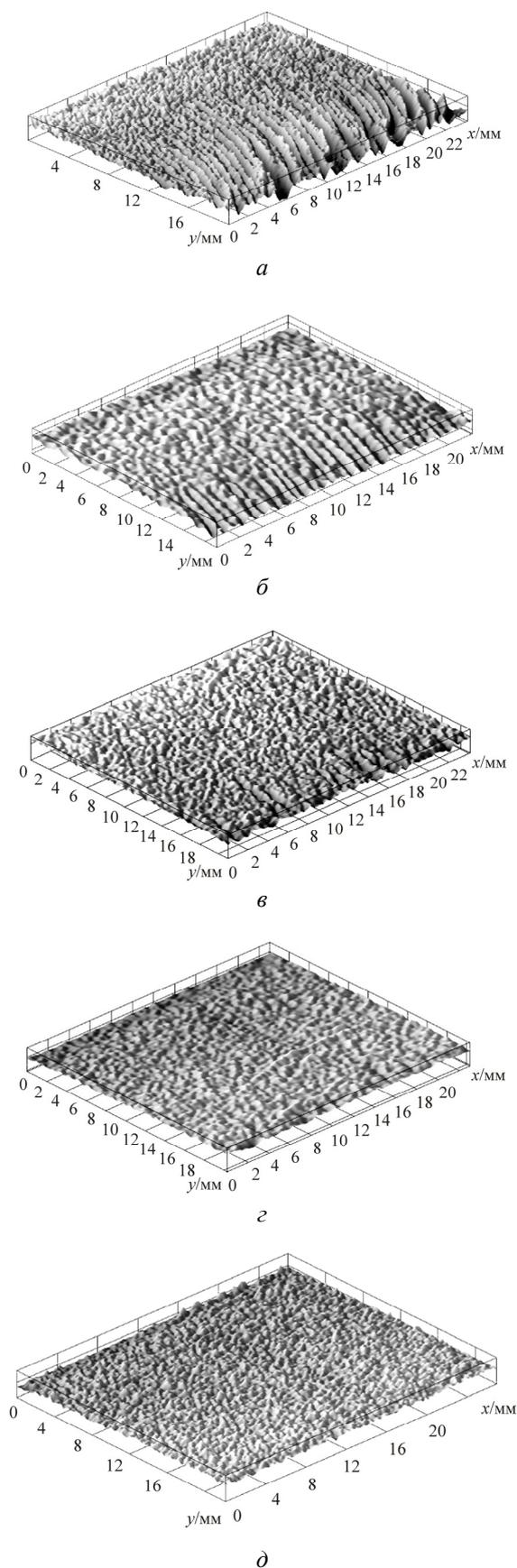


Рис. 8. Трехмерная реконструкция поверхности реза при скорости перемещения струи вдоль реза, м/с: а – 256,24; б – 170,02; в – 106,66; г – 76,62; д – 59,28

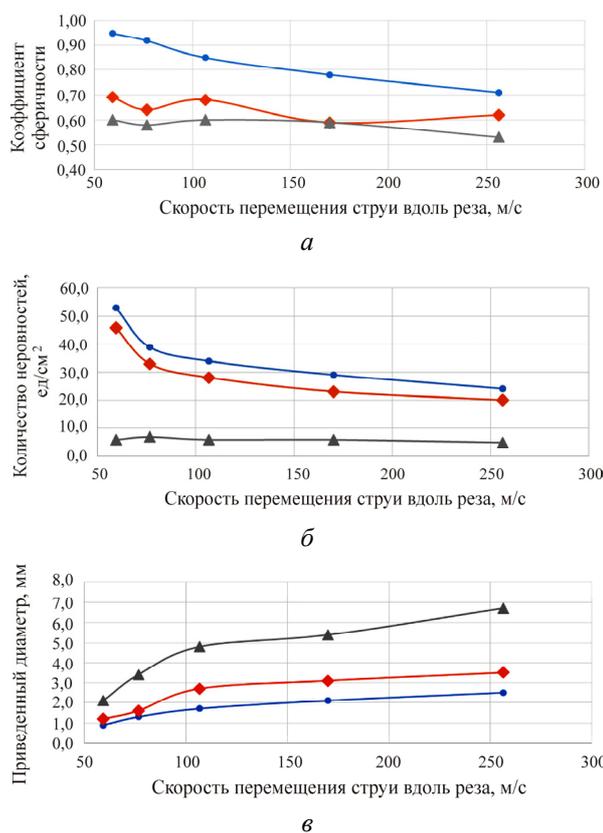


Рис. 9. Морфологические характеристики неровностей рельефа различных зон поверхности реза в зависимости от скорости подачи абразива: а – коэффициент сферичности; б – количество на единицу площади, ед/см²; в – приведенный диаметр, мм

В ходе исследования с помощью метода анализа изображений установлены особенности зонирования и площадного распределения характерных зон поверхности реза в зависимости от скорости перемещения струи вдоль реза. Преимуществами использования метода анализа изображений при оценке состояния поверхности реза являются возможность выявления особенностей неровностей, формирующих рельеф, в зависимости от данного параметра по показателям коэффициента сферичности, площади, а также количеству на единицу площади, а также возможность получения наглядной трехмерной визуализации. Трехмерная визуализация позволяет информировать заказчика работ о состоянии поверхности реза при различных условиях его получения, быстро сформировать представление о качестве результата и тем самым оптимизировать процедуру выбора скоростей обработки с соблюдением баланса экономических и технических запросов заказчика.

Список литературы

1. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей. – М.: Машиностроение, 2004. – 240 с. (Библиотека технолога).

2. Тихомиров Р.А., Петухов Е.Н., Кравченко Д.В. Развитие технологии обработки сверхзвуковыми струями жидкости различного состава // Изв. ТулГУ. Машиностроение. – 2000. – Вып. 5. – С. 63–68.
3. Тамаркин М.А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Ростов н/Д, 1995. – 32 с.
4. Потапов В.А. Струйная обработка: состояние и перспективы развития в Европе и мире // Вестник машиностроения. – 1996. – № 1. – С. 26–30.
5. Непомнящий Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М.: Наука, 1971. – С. 190–200.
6. Шманев В.А., Шулепов А.П., Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1995. – 350 с.
7. Analysis of acoustic emission emerging during hydro abrasive cutting and options for indirect quality control / S. Hloch, J. Valíček, D. Kozak, H. Tozan, S. Chattopadhyaya, P. Adamčík // The Int. J. of Adv. Manuf. Techn. – 2013. – Vol. 66. – P. 45–58.
8. Тарасов В.А., Полухин А.Н. Оценка геометрических параметров формируемой поверхности при гидроабразивной обработке // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 107–113.
9. Vibration as a source of information for abrasive waterjet monitoring / S. Hloch, V. Perzel, P. Hreha, H. Tozan, J. Valíček // J. of Naval Sci. and Eng. – 2011. – Vol. 7(1). – P. 71–85.
10. Assessment of cutting tool condition by acoustic emission / M.P. Gómez, A.M. Hey, C.E. D'Attelis, J.E. Ruzante // Procedia Materials Science. – 2002. – Vol. 1. – P. 321–328.
11. Санинский В.А., Тышкевич В.Н., Александров А.А. Комплектование многоместного приспособления для одновременной гидроабразивной обработки длинномерных труб // Изв. Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 5. – С. 46–50.
12. Кириллов О.Н., Смоленцев В.П., Котуков В.И. Механизм формирования геометрии переходных участков при комбинированной обработке // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12, № 3. – С. 71–76.
13. Иванов В.В., Решетников М.К. Компьютерное имитационное моделирование процесса гидроабразивного резания // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – № 2(79). – С. 46–49.
14. Мещеряков А.В., Шулепов А.П. Математическая модель процесса формирования микрорельефа поверхности при струйной гидроабразивной обработке // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 235–242.
15. О возможности гидроабразивной резки синтетических минеральных сплавов (базальтового литья) и натурального камня / А.М. Игнатова, Р.Н. Шаритнов, О.В. Сидоров, О.В. Лапчинская // Базальтовые технологии. – 2014. – № 12. – С. 71.
16. Игнатова А.М., Игнатов М.Н., Шаритнов Р.Н. Классификация основных элементов технологической системы гидроабразивного резания для обеспечения точности и качества поверхности реза // Машиностроение: сет. электрон. науч. журн. – 2015. – Т. 3, № 1. – С. 17–20.

References

1. Stepanov Iu.S., Barsukov G.V. Sovremennye tekhnologicheskie protsessy mekhanicheskogo i gidrostruynogo raskroia tekhnicheskikh tkanei [Modern technological processes of mechanical and hydrojet cutting of technical fabrics]. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 240 p. (Biblioteka tekhnologa).
2. Tikhomirov R.A., Petukhov E.N., Kravchenko D.V. Razvitie tekhnologii obrabotki sverkhzvukovymi struiami zhidkosti razlichnogo sostava [Development of technology for treatment of liquids with supersonic jets of different composition]. *Izvestia Tulkogo gosudarstvennogo univertsiteta. Mashinostroenie*, 2000, iss. 5, pp. 63–68.
3. Tamarkin M.A. Tekhnologicheskie osnovy optimizatsii protsessov obrabotki detalei svobodnymi abrazivami [Technological basis for optimizing the process of parts machining with free abrasives]. Ph. D. thesis. Rostov na Donu, 1995, 32 p.
4. Potapov V.A. Struinaia obrabotka: sostoianie i perspektivy razvitiia v Evrope i mire [Blasting: state and prospects of development in Europe and the world]. *Vestnik mashinostroeniia*, 1996, no. 1, pp. 26–30.
5. Nepomniashchii E.F. Trenie i iznos pod vozdeistviem strui tverdykh sfericheskikh chastits [Friction and wear under the influence of spherical solids jet]. *Kontaknoe vzaimodeistvie tverdykh tel i raschet sil treniia i iznosa*. Moscow: Nauka, 1971, pp. 190–200.
6. Shmanev V.A., Shulepov A.P., Meshcheriakov A.V. Struinaia gidroabrazivnaia obrabotka detalei GTD [Jet waterjet blasting of GTE parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 350 p.
7. Hloch S., Valíček J., Kozak D., Tozan H., Chattopadhyaya S., Adamčík P. Analysis of acoustic emission emerging during hydro abrasive cutting and options for indirect quality control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 66, pp. 45–58.
8. Tarasov V.A., Polukhin A.N. Otsenka geometricheskikh parametrov formiruemoi poverkhnosti pri gidroabrazivnoi obrabotke [Assessment of geometric parameters of the formed surface during waterjet blasting]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Mashinostroenie*, 2012, no. 1, pp. 107–113.
9. Hloch S., Perzel V., Hreha P., Tozan H., Valicek J. Vibration as a source of information for abrasive waterjet monitoring. *Journal of Naval Science and Engineering*, 2011, vol. 7(1), pp. 71–85.
10. Gómez M.P., Hey A.M., D'Attelis C.E., Ruzante J.E. Assessment of cutting tool condition by acoustic emission. *Procedia Materials Science*, 2002, vol. 1, pp. 321–328.
11. Saninskii V.A., Tyshkevich V.N., Aleksandrov A.A. Komplektovanie mnogomestnogo prispособleniia dlia odnovremennoi gidroabrazivnoi obrabotki dlinnomernykh trub [Fitting of a multi-place fixture for simultaneous waterjet blasting of longitudinal pipes]. *Izvestia Volgogradskogo go-*

sudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, no. 5, pp. 46–50.

12. Kirillov O.N., Smolentsev V.P., Kotukov V.I. Mekhanizm formirovaniia geometrii perekhodnykh uchastkov pri kombinirovannoi obrabotke [The mechanism of formation of geometry of transition sites at the combined processing]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 12, no. 3, pp. 71–76.

13. Ivanov V.V., Reshetnikov M.K. Komp'uternoe imitatsionnoe modelirovanie protsessa gidroabrazivnogo rezaniia [Computer simulation of waterjet cutting process]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 2(79), pp. 46–49.

14. Meshcheriakov A.V., Shulepov A.P. Matematicheskaia model' protsessa formirovaniia mikrorel'efa poverkhnosti pri struinoi gidroabrazivnoi obrabotke [Mathematical model of the process of surface microrelief formation at jet waterjet blasting]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaia tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 235–242.

15. Ignatova A.M., Shartinov R.N., Sidorov O.V., Lapchinskaia O.V. O vozmozhnosti gidroabrazivnoi rezki sinteti-cheskikh mineral'nykh splavov (bazal'tovogo lit'ia) i natural'nogo kamnia [About the possibility of hydroabrasive cutting of synthetic mineral alloys (basalt casting) and natural stone]. *Bazal'tovye tekhnologii*, 2014, no. 12, pp. 71.

16. Ignatova A.M., Ignatov M.N., Sharitnov R.N. Klassifikatsiia osnovnykh elementov tekhnologicheskoi sistemy gidroabrazivnogo rezaniia dlia obespecheniia tochnosti i kachestva poverkhnosti reza [Classification of the main elements of the waterjet cutting system to ensure the accuracy and quality of the cutting surface]. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 17–20.

Получено 19.02.18

Опубликовано 21.03.19

Сведения об авторах

Игнатова Анна Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Пермского краевого центра охраны труда Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iampstu@gmail.com.

Балабанов Сергей Константинович (Пермь, Россия) – студент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Игнатов Михаил Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: imnpstu@gmail.com.

About the authors

Anna M. Ignatova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Leading Researcher Scientist, Perm Center of Occupational Safety, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iampstu@gmail.com.

Sergey K. Balabanov (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Welding, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University.

Mikhail N. Ignatov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: imnpstu@gmail.com.