

УДК 621.91.01

Некоторые особенности стружкообразования при гидроабразивной обработке

Сильвио Симон¹, Н.Д. Юсубов², С.Ф. Амирли², Ф.Г. Амиров²¹ Бранденбургский технический университет² Азербайджанский Технический Университет

Certain features of chip formation in the waterjet machining

Sylvio Simon¹, N.D. Yusubov², S.F. Amirli², F.G. Amirov²¹ Brandenburg University of Technology² Azerbaijan Technical University

Согласно стандарту DIN8580-1974, гидроабразивная резка относится к группе процессов резания с геометрически неопределенной режущей кромкой. Такая механическая обработка основана на использовании водяной струи высокого давления с абразивными добавками или без них. Теоретическим путем исследованы динамические показатели гидроабразивной резки материалов. Выведены уравнения для давления при подаче водяной струи с абразивами в зону резания перпендикулярно и под углом к обрабатываемой поверхности. Используются различные методы подачи водяной струи с абразивными частицами на обрабатываемую поверхность. Исследованы динамические показатели стружкообразования при резании материала HARDOX 500. Исследования формы и геометрических размеров отдельных абразивных частиц проведены с помощью микроскопа отраженного света с последующей обработкой изображения в среде компьютерной программы. Для каждой частицы определены длина и ширина, длина окружности и углы заострения отдельных абразивных частиц при максимальном увеличении (в 49 раз) абразивного материала. Выведены уравнения для давления при гидроабразивной обработке с внедрением абразивной частицы в обрабатываемую поверхность. Определены длина, ширина, длина окружности и углы отдельных стружек после гидроабразивной резки.

EDN: KMPJYM, <https://elibrary/kmpjym>

Ключевые слова: гидроабразивная резка, геометрическая форма стружек, абразивные частицы, обработка материалов, форма абразивной частицы

According to the DIN8580-1974 standard, waterjet cutting belongs to the group of cutting processes with the geometrically indefinite cutting edge. Such mechanical machining is based on using a high-pressure water jet with or without abrasive additives. The paper theoretically studies dynamic indices of the materials' waterjet cutting. Equations are derived for the pressure force when feeding a water jet with abrasives to the contact zone, feeding a water jet perpendicularly and at an angle to the cutting surface. Various methods of feeding water jet with abrasive particles to the machined surface are used. Dynamic parameters of chip formation in cutting the HARDOX 500 material are analyzed. Separate abrasive particles geometric shape and perimeter dimensions are studied using the reflected light microscope with subsequent image processing in the computer software environment. Length and width, circumference and angles of separate grains are determined for each particle at maximum magnification by 49 times. Pressure force equations are derived for waterjet machining and when introducing an abrasive grain into the machined

surface. Separate chip length, width, circumference and angles are identified after waterjet cutting.

EDN: KMPJYM, <https://elibrary/kmpjym>

Keywords: waterjet cutting, chip geometric shape, abrasive particles, material machining, shape of abrasive grain

Гидроабразивная резка (ГАР) вместе с лазерной резкой плавлением и плазменной резкой [1, 2] входит в состав группы абляционных процессов, в частности, изнашивания.

Такая технология изготовления деталей из различных материалов получила широкое применение в машино-, авиастроении и других отраслях промышленности. При ГАР раскрой металлических деталей происходит с высокой точностью, благодаря чему они имеют низкую себестоимость.

Технологический процесс ГАР основан на принципе эрозионного воздействия смеси абразивного материала и водяной струи, подаваемой с высокой скоростью в зону резания. Физическая сущность ГАР материалов, включая сталь, состоит в снятии стружки и ее удалении из зоны резания скоростным потоком водяной струи, смешанной с абразивными частицами (АЧ) [1, 3–7].

Образование стружки при резании заготовки происходит под действием удара АЧ, направляемых в зону резания водяной струей с высокой скоростью [1, 8, 9].

Форма стружки и скорость ее отделения от заготовки зависят от физико-механических свойств абразивного и обрабатываемого материалов, скорости продольной подачи гидроабразивной струи из сопла и угла, под которым она подается в зону резания. В зависимости от указанных технологических параметров формируются различные формы стружки, что влияет на геометрическую погрешность и шероховатость обрабатываемой поверхности (ОП) [1, 10–13].

Форма АЧ оказывает значительное влияние на геометрические параметры стружки, которые зависят от твердости, зернистости и остроты грани АЧ [14–16, 8, 9].

Цель работы — определение динамических показателей ГАР путем теоретических расчетов, вывод уравнения для полного давления, инерционного давления АЧ и составляющих силы резания при соударении с одним АЧ. С учетом геометрических размеров АЧ и диаметра сопла выполнен расчет количества АЧ, участвующих в процессе резания. Экспериментально исследованы процессы дробления АЧ и пластической деформации стружки.

дованы процессы дробления АЧ и пластической деформации стружки.

Методика исследования. Теоретическим путем рассчитывали динамические показатели при ГАР материалов. Выводили уравнения для общего давления при подаче гидроабразивной струи перпендикулярно и под углом к ОП. Эмпирическими методами с использованием режимных параметров ГАР и характеристик обрабатываемого материала получали уравнения для силы резания и ее составляющих в зависимости от количества АЧ, участвующих в процессе резания.

Проводили количественные и качественные исследования по определению количества АЧ из гранатового песка фракции 177 мкм (80 меш). Геометрические параметры АЧ до и после обработки материалов измеряли микроскопом отраженного света Nikon SMZ-10A. Для определения геометрических параметров (длины, ширины, длины окружности и углов заострения) АЧ исследовали пять зерен гранатового песка, рассыпая их на предметном стекле микроскопа. Обработку полученных результатов для каждой АЧ выполняли на персональном компьютере со специальным программным обеспечением.

Благодаря 10-кратному увеличению в объективе микроскопа и 4,9-кратному увеличению в окуляре максимальные размеры зерен гранатового песка увеличивались в 49 раз. При расчетах учитывали средние значения, стандартные отклонения, минимальные отклонения АЧ.

Эксперименты проводили при контурной резке цилиндрической детали диаметром 30 мм струей воды с гранатовым песком, подаваемой под давлением 2500 бар.

Результаты и их обсуждение. Отделение стружки от ОП заготовки происходит благодаря высокой скорости истекания и сверхвысокого давления водяной струи, смешанной с АЧ, которые ударяются об ОП. Производительность обработки и механизм стружкообразования во многом зависят от схемы подачи гидроабразивной струи в зону резания.

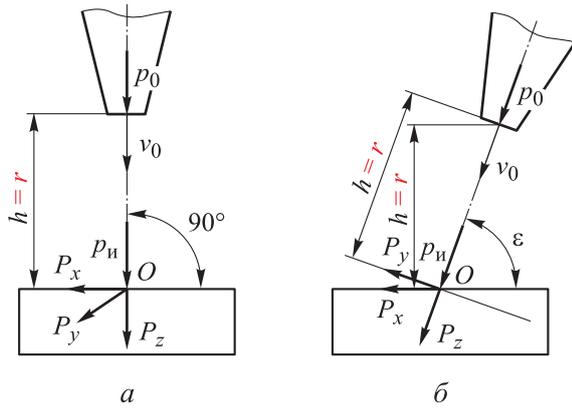


Рис. 1. Схемы подачи гидроабразивной струи в зону резания

Рассмотрены две схемы подачи гидроабразивной струи в зону резания [17], приведенные на рис. 1. Согласно первой схеме (рис. 1, а) гидроабразивная струя подается в зону резания перпендикулярно ОП заготовки под давлением p_0 . Расстояние от сопла до ОП h зависит от механических свойств материала заготовки.

Гидроабразивная струя движется к ОП со скоростью v_0 и соприкасается с ней в точке O , вследствие чего ОП подвергается ударам АЧ с инерционным давлением p_n . Это приводит к возникновению тангенциальной P_z , нормальной P_y и осевой P_x составляющих силы резания, под действием которых образуется стружка, возникают пластическая деформация и шероховатость обрабатываемого материала.

Нормальная составляющая силы резания P_y направлена перпендикулярно ОП, две другие ее составляющие расположены по отношению к P_y под углом 90° . Под действием тангенциальной составляющей силы резания P_z происходят отделение материала от заготовки в виде стружки и пластическая деформация обрабатываемого материала. Осевая составляющая силы резания P_x участвует в удалении стружки струей из зоны резания.

Анализ технологического процесса ГАР позволил установить, что подача гидроабразивной струи является свободной подачей жидкости с централизованными турбулентными характеристиками.

Общее давление в точке O при подаче гидроабразивной струи определяется выражением

$$p = p_0 + p_n, \text{ Па.}$$

Инерционное давление можно вычислить с помощью теории изменения траектории АЧ при их подаче в зону резания водяной струей

под сверхвысоким давлением [17, 18] в период изменения времени dt следующим образом:

$$p_n dt = mQ dtv_0,$$

где m — вес всех АЧ в струе, г/с; Q — расход воды за одну секунду.

Отсюда следует, что $mQ dtv_0$ является суммарным изменением движения струи. С учетом количества АЧ, участвующих в процессе резания, и расхода воды Q после преобразований суммарное изменение движения струи можно записать как

$$p_n = mQv_0 = \frac{Zm_z v_0^2}{r},$$

где Z — количество АЧ, ударяющихся о поверхность в точке O за одну секунду; m_z — средняя масса АЧ с водой, кг; r — радиус падения АЧ, $r = h$ (см. рис. 1).

Гидродинамический анализ струи показал, что общее давление, возникающее на поверхности резания, превышает первоначальное давление p_0 на величину $Zm_z v_0^2 / r$:

$$p = p_0 + p_n = p_0 + \frac{Zm_z v_0^2}{r}, \text{ Па.}$$

При применении второй схемы подачи гидроабразивной струи в зону резания под углом ϵ (рис. 1, б) инерционное давление определяется как

$$p_n = mQv_0 \text{tg } \epsilon$$

или

$$p_n = \frac{Zm_z v_0^2}{r} \text{tg } \epsilon,$$

а общее давление, действующее на ОП в точке O ,

$$p = p_0 + \frac{Zm_z v_0^2}{r} \text{tg } \epsilon.$$

Анализ процесса стружкообразования при различных схемах подачи гидроабразивной струи выявил изменение общего давления, так как в различных схемах резания изменяется инерционное давление АЧ. Это приводит к изменению общего давления, что предопределяет выход стружками АЧ. Установлено, что отдельные АЧ, смешиваясь с водой и ударяясь о поверхность заготовки острым концом, внедряются в обрабатываемый материал.

Угол внедрения АЧ в ОП зависит от формы и угла заострения отдельных АЧ. При сопри-

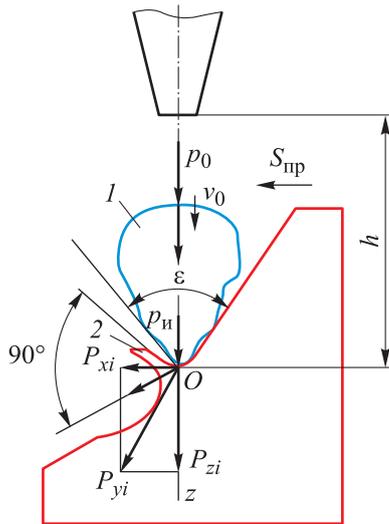


Рис. 2. Схема внедрения АЧ в ОП заготовки:
1 — АЧ; 2 — стружка

косновении с обрабатываемым материалом АЧ поворачиваются на угол ε вокруг оси Oz (рис. 2). Угол поворота АЧ во многом определяется формой его профиля.

Гранатовый песок имеет более высокую твердость и низкую себестоимость, чем другие абразивные материалы. Твердость гранатового песка составляет 7,5...8,0 по шкале Мооса, а острота АЧ является достаточно большой.

Результаты исследования формы АЧ и измерения их размеров до проведения ГАР приведены на рис. 3, а. Определенные по полученным результатам геометрические параметры профиля отдельных АЧ (длина, ширина, длина окружности, площадь поверхности и углы заострения) указаны в табл. 1.

Например, длина частицы Abrassiv 3_1 составляет 401,3 мкм, ширина — 329,5 мкм, длина окружности — 1124,6 мкм, площадь поверхности — 85183,4 мкм², угол заострения с одной стороны — 162,6°, а с другой — 138,8°.

Экспериментально установлено, что после ГАР АЧ, ударяясь об ОП, раздробляются, меняют форму и размеры отдельных граней.

Обе АЧ Abrassiv 3_1 и Abrassiv 3_2 (см. рис. 3, а) перед проведением эксперимента окрашивали белой нитрокраской, чтобы после его окончания измерить их размеры. Окрашенные АЧ массой 0,5 г в составе водяной струи направлялись на ОП, после ГАР АЧ попадали вместе со стружкой в специальную ванну, подвешенную под заготовкой на столе станка. После микрорезания материала окрашенные АЧ извлекали из ванны с помощью магнита и ис-

следовали изменение их формы под микроскопом. Следует отметить, что выполнение такого эксперимента отличается трудоемкостью и сложностью.

Результаты исследования формы и измерения размеров АЧ после проведения ГАР приведены на рис. 3, б и в табл. 1, где Abrassiv 2_4 и Abrassiv 2_5 являются АЧ, полученными после резки частиц Abrassiv 3_1 и Abrassiv 3_2 соответственно. Анализ АЧ, приведенных на рис. 3, а и б, показал, что АЧ при ударе об ОП уменьшаются, разделяясь на несколько частей. Кроме того, изменяются форма и углы заострения АЧ.

Раскалываясь, АЧ внедряются в ОП, и последующие АЧ, непрерывно подаваемые вместе с водяной струей под высоким давлением, ударяют по внедренным АЧ, что приводит к повторному дроблению АЧ, вследствие чего формы и размеры АЧ изменяются.

Существуют технологические параметры, которые оказывают значительное влияние на формирование стружки при ГАР. Форма и угол съема стружки зависят от давления режущей струи, скорости ее продольной подачи из сопла, зернистости и твердости АЧ, расхода АЧ, расстояния от сопла до ОП и физико-механи-

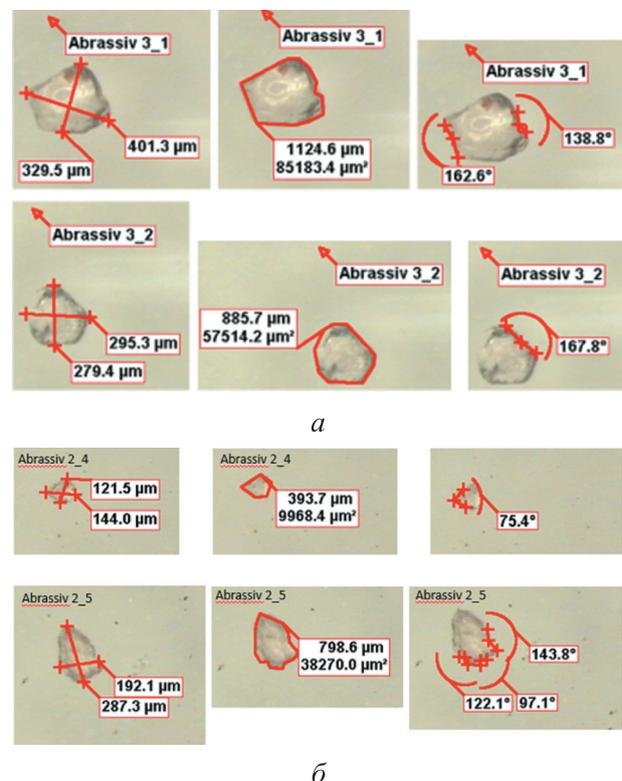


Рис. 3. Результаты исследования формы и измерения размеров АЧ до (а) и после (б) проведения ГАР

Таблица 1

Геометрические параметры профиля АЧ до и после проведения ГАР

Обозначение АЧ	Длина, мкм	Ширина, мкм	Длина окружности, мкм	Площадь поверхности, мкм	Угол заострения, град
<i>До проведения ГАР</i>					
Abrassiv 3_1	329,5	401,3	1124,6	85183,4	138,8; 162,6
Abrassiv 3_2	295,3	279,4	885,7	57514,2	167,8
<i>После проведения ГАР</i>					
Abrassiv 2_4	121,5	144,0	393,7	9968,4	75,4
Abrassiv 2_5	192,1	287,3	798,6	38270,0	143,8; 122,1

ческих характеристик обрабатываемого материала.

Для изучения формы стружки использовали заготовку круглого профиля из стали HARDOX 500 толщиной 20 мм. Контурную резку цилиндрической заготовки осуществляли под давлением струи 2500 бар при расходе абразивного материала 85 г/м и скорости продольной подачи 77,4 мм/мин.

Резку заготовки проводили на станке FLOW-Cut с программным управлением. Экспериментальные исследования выполняли на кафедре «Металлорежущие станки» Бранденбургского технического университета (Германия). Для определения механизма образования стружки исследовали ее форму и геометрические параметры.

Некоторые результаты измерения угла деформации стружек после проведения ГАР приведены на рис. 4 и в табл. 2, где видно, что угол профиля стружек изменяется от 80,1 (Span 1_3) до 151,9° (Span 1_1). Это показывает, что металлическая стружка изгибается в процессе пластической деформации отдельных АЧ в широком диапазоне.

Толщина стружки также изменяется в широком диапазоне. Например, толщина стружки Span 1_3, показанной на рис. 4, составляет 1,3 мкм, Span 1_4 — 1,5 мкм, Span 1_1 — 0,8 мкм. На основании результатов измерения толщины стружек можно заключить, что после соприкосновения с обрабатываемым материалом АЧ внедряются в него под разными углами, поэтому их профиль изменяется.

Формы АЧ существенно различаются, и когда в точке О АЧ начинает внедряться в обрабатываемый материал, она поворачивается относительно оси z (или x) на угол $\epsilon/2$ и ложится боком к ОП по контактной линии ОВ (см. рис. 2). При касании вершины АЧ в точ-

ке О под действием давлений p_0 и p_n возникает сила резания, которая формирует образование стружки, удаляемой из зоны обработки с помощью струи.

В зоне контакта АЧ с ОП происходит пластическая деформация стружки с эрозионным воздействием водяной струи. Отрываясь, фрагменты обрабатываемого материала приобретают различные размеры и форму.

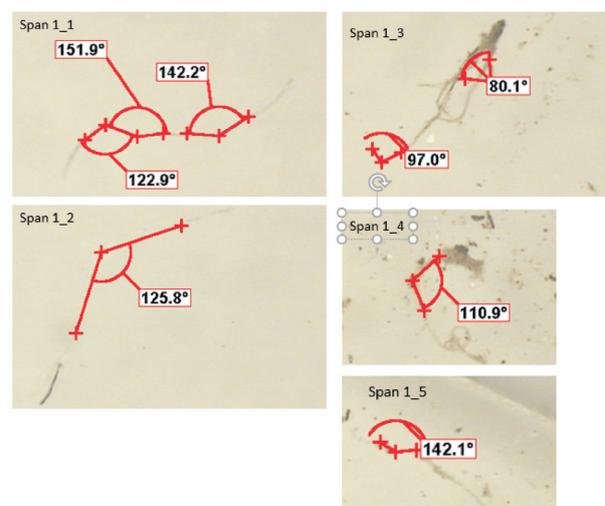


Рис. 4. Результаты измерения угла деформации стружек после проведения ГАР

Таблица 2

Значения угла деформации стружек после проведения ГАР

Обозначение АЧ	Угол деформации, град
Span 1_1	151,9; 142,2; 122,9
Span 1_2	125,8
Span 1_3	80,1; 97,0
Span 1_4	110,9
Span 1_5	142,1

Также на устойчивость и эффективность стружкообразования при ГАР и протекание пластической деформации стружки влияют химический состав, механические характеристики обрабатываемого материала и угол внедрения АЧ ϵ .

Удаление стружки из зоны резания происходит одновременно с такими процессами, как соударение АЧ между собой внутри набегающего водяного потока, дробление отдельных АЧ, эмалирование ОП, отскакивающими от нее АЧ и т. д.

В этих условиях стружкообразование зависит от направления движения гидроабразивной струи. Количество ударов АЧ об ОП зависит от размерной фракции абразивного материала и геометрических параметров АЧ, смешанных с водяной струей.

Как видно из рис. 2, при резании материала одной (i -й) АЧ под действием давлений p_0 и p_i в координатной системе xuz возникают тангенциальная P_{zi} , нормальная P_{yi} и осевая P_{xi} составляющие силы резания.

В зависимости от концентрации АЧ об ОП ударяется различное количество АЧ. С учетом этого составляющие силы резания всех АЧ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} P_z &= \sum P_{zi} = ZP_{zi}; \\ P_y &= \sum P_{yi} = ZP_{yi}; \\ P_x &= \sum P_{xi} = ZP_{xi}. \end{aligned}$$

Эмпирическая формула для вычисления составляющих силы резания при резании материала i -й частицей имеет вид

$$P_{zi} = P_{yi} = P_{xi} = \left(p_0 + \frac{Zm_z v_0^2}{r} \right) S,$$

где S — площадь слоя, срезаемого i -й частицей.

Отсюда с учетом режимов обработки можно записать

$$\begin{aligned} P_{zi} &= C_{pz} Q_{pz}^{xz} S_{np}^{yz} t^{zz}; \\ P_{yi} &= C_{py} Q_{py}^{xy} S_{np}^{yy} t^{zy}; \\ P_{xi} &= C_{px} Q_{px}^{xx} S_{np}^{yx} t^{zx}, \end{aligned}$$

где C_{pz} , C_{py} , C_{px} — коэффициенты, учитывающие условия резания и механические свойства обрабатываемого материала; Q и S_{np} — расход и скорость продольной подачи гидроабразивной струи; t — глубина резания (ширина канавок образовавшихся в процессе резания); x , y , z — показатели степени парамет-

ров Q , S_{np} , t в соответствующих направлениях координатной системы.

Чтобы определить зависимость указанных коэффициентов C_{pz} , C_{py} , C_{px} и показателей степени от обрабатываемого материала, АЧ и режимных параметров, в дальнейшем будут проведены экспериментальные исследования. (Для других методов механической обработки и материалов эти параметры приведены в Справочнике технолога машиностроения под редакцией А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова, 1985 г.).

Количество АЧ при ГАР, участвующих в резании, зависит от концентрации АЧ в водяной струе, скорости смешивания (высасывания) абразивного материала и диаметра сопла. Как уже отмечалось, расход абразивного материала принят равным 85 г/мин. Исследованиями установлено, что один грамм гранатового песка фракции 177 мкм содержит 300...340 АЧ.

Из этого можно определить, что в течение одной минуты в процессе ГАР участвуют 25 500...28 900 АЧ (в течение одной секунды 425...482 АЧ).

При ГАР использовали сопло с отверстием диаметром 0,355 мм, которое при давлении 2500 бар пропускало струю с десятью–пятнадцатью АЧ.

Анализ процесса ГАР позволил выявить, что АЧ в процессе ударного воздействия на материал заготовки раздробляются и изнашиваются, что приводит к потере режущей способности отдельных АЧ. Поэтому срок службы АЧ снижается.

Выводы

1. В результате теоретических исследований по ГАР материалов разработана математическая модель для расчета полного давления на поверхность резания с учетом подачи водяной струи с АЧ в зону обработки при различных схемах подачи.

2. Установлено, что при ГАР в зоне резания под давлением водяной струи АЧ ударяются об обрабатываемый материал с инерционным давлением, которое оказывает значительное влияние на механизм стружкообразования. Предложена математическая модель для определения инерционного давления с учетом теории изменения траектории АЧ в условиях их подачи в зону резания водяной струей под сверхвысоким давлением.

3. Выведена математическая модель для инерционного давления с учетом расходов абразивного материала, воды и скорости истечения гидроабразивной струи. Определена зависимость инерционного давления от угла подачи гидроабразивной струи в зону обработки.

4. Экспериментальными исследованиями установлено, что АЧ, имеющие различную остроту граней, под действием инерционного давления поворачиваются на определенный угол при ударе о заготовку и внедряются в ОП,

формируя стружку, угол деформации и форма которой постоянно меняются. Выявлено, что под действием инерционного давления АЧ вырываются, раздробляются и изнашиваются.

5. На основании данных теоретических и экспериментальных исследований выведены эмпирические формулы для тангенциальной, нормальной и осевой составляющих силы резания с учетом отдельных АЧ, расхода воды, скорости продольной подачи струи и глубины резания материалов.

Литература

- [1] Амиров Ф.Г., Симон С., Стеффен У. и др. Определение точности при обработке давлением воды с использованием SD-сканирования. *Вестник Азербайджанской Инженерной академии*, 2021, т. 13, № 3, с. 38–44, doi: <https://doi.org/10.52171/2076-0515202113033844>
- [2] Steffen W. *Schneiden mit dem Wasserstrahl*. Masterthesis. BTU Cottbus–Senftenberg, 2014. 38 p.
- [3] Яглицкий Ю.К. Моделювання технологічного процесу гідроабразивного різання у судобудуванні. *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Нові рішення в сучасних технологіях*, 2018, № 45, с. 78–86, doi: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.10>
- [4] Барсуков Г.В. Исследование погрешности формы при резании листовых материалов гидроабразивной струей. *Сб. тр. межд. науч.-тех. конф. Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения. Технология-2003*, 2003, с. 449–455.
- [5] Барсуков Г.В. *Повышение эффективности гидроабразивного резания на основе дискретного регулирования состояний технологической системы*. Дисс. ... док. тех. наук. Орел, ОрелГТУ, 2006. 411 с.
- [6] Schulz F. *Fertigungstechnik*. Springer, 2015. 527 p.
- [7] Игнатова А.М., Балабанов С.К., Игнатов М.Н. Исследование зонированности поверхности гидроабразивного реза конструкционной стали обыкновенного качества методом анализа изображений. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2019, т. 21, № 1, с. 83–90, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2019.1.12>
- [8] Will D., Gebhardt N., Ströhl H. *Hydraulik. Grundlagen, Komponenten, Schaltungen*. Springer, 2007. 442 p.
- [9] Zeng J., Munoz J.P. Intelligent automation of AWJ cutting for efficient production. *Proc. 12th Int. Symp on Jet Cutting Technology, BHRA*. Rouen, France, 1994, pp. 401–408.
- [10] Aurich J., Dornfeld D., Arrazola P. et al. Burrs — analysis, control and removal. Springer, 2009. 254 p.
- [11] Wälder K., Wälder O. *Statistische Methoden der Qualitätssicherung*, München, Wien, Carl Hanser, 2013. 200 p.
- [12] Kolb M. *Wasserstrahlschneiden. Materialbearbeitung mit einem Hochdruckwasserstrahl*. München, Moderne Industrie, 2006. 8 p.
- [13] Hörbinger M. *Wasserstrahlschneiden: Verfahrensmöglichkeiten und Vergleich mit alternativen industriellen*. Technik – Bachelorarbeit, 2011. 43 p.
- [14] Risse A. *Fertigungsverfahren der Mechanik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Springer, 2012. 547 p.
- [15] Tamarkin M.A., Tikhonov A.A., Tishchenko E.E. Metal removal in hydroabrasive machining. *Russ. Engin. Res.*, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 175–177, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14030150>
- [16] Тамаркин М.А., Шевцов С.Н., Клименко А.А. Моделирование процесса единичного взаимодействия гранулы свободного абразива и обрабатываемой детали. *Автоматизация и современные технологии*, 2005, № 5, с. 308–312.

- [17] Mirzajanzada A.X., Gurbanov R.S., Ahmadov Z.M. *Hidravlika: ali texniki məktəb və fakültələri üçün dərslik*. Bakı, Maarif nəşriyyatı, 1990. 280 s.
- [18] Gadirov N.B. *Nəzəri mexanika kursu*. Bakı Universiteti nəşriyyatı, 1996. 550 s.

References

- [1] Amirov F.G., Simon S., Steffen U. et al. Determining the accuracy of water pressure processing using 3D scanning. *Vestnik Azerbaydzhanskoy Inzhenernoy akademii* [Herald of the Azerbaijan Engineering Academy], 2021, vol. 13, no. 3, pp. 38–44, doi: <https://doi.org/10.52171/2076-0515202113033844>
- [2] Steffen W. *Schneiden mit dem Wasserstrahl*. Masterthesis. BTU Cottbus–Senftenberg, 2014. 38 p.
- [3] Yaglitiskiy Yu.K. Modeling of the technological process of water-jet cutting in shipbuilding. *Visnik NTU «KhPI». Ser. Novi rishennya v suchasnikh tekhnologiyakh* [Bulletin of NTU "KhPI". Ser. New Solutions in Modern Technologies], 2018, no. 45, pp. 78–86, doi: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.10>
- [4] Barsukov G.V. [Investigation of shape error at cutting of sheet materials by water-jet]. *Sb. tr. mezhd. nauch.- tekh. konf. Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhnologii mashinostroeniya. Tekhnologiya-2003* [Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. Fundamental and Applied Problems of Machine Building Technology. Technology-2003], 2003, pp. 449–455. (In Russ.).
- [5] Barsukov G.V. *Povyshenie effektivnosti gidroabrazivnogo rezaniya na osnove diskretnogo regulirovaniya sostoyaniy tekhnologicheskoy sistemy*. Diss. dok. tekh. nauk [Increasing the efficiency of waterjet cutting on the basis of discrete regulation of technological system states. Doc. Tech. Sci. Diss.]. Orel, OrelGTU Publ., 2006. 411 p. (In Russ.).
- [6] Schulz F. *Fertigungstechnik*. Springer, 2015. 527 p.
- [7] 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. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2019, vol. 21, no. 1, pp. 83–90, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2019.1.12> (in Russ.).
- [8] Will D., Gebhardt N., Ströhl H. *Hydraulik. Grundlagen, Komponenten, Schaltungen*. Springer, 2007. 442 p.
- [9] Zeng J., Munoz J.P. Intelligent automation of AWJ cutting for efficient production. *Proc. 12th Int. Symp on Jet Cutting Technology, BHRA*. Rouen, France, 1994, pp. 401–408.
- [10] Aurich J., Dornfeld D., Arrazola P. et al. Burrs — analysis, control and removal. Springer, 2009. 254 p.
- [11] Wälder K., Wälder O. *Statistische Methoden der Qualitätssicherung*, München, Wien, Carl Hanser, 2013. 200 p.
- [12] Kolb M. *Wasserstrahlschneiden. Materialbearbeitung mit einem Hochdruckwasserstrahl*. München, Moderne Industrie, 2006. 8 p.
- [13] Hörbinger M. *Wasserstrahlschneiden: Verfahrensmöglichkeiten und Vergleich mit alternativen industriellen*. Technik – Bachelorarbeit, 2011. 43 p.
- [14] Risse A. *Fertigungsverfahren der Mechantronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Springer, 2012. 547 p.
- [15] Tamarkin M.A., Tikhonov A.A., Tishchenko E.E. Metal removal in hydroabrasive machining. *Russ. Engin. Res.*, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 175–177, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14030150>
- [16] Tamarkin M.A., Shevtsov S.N., Klimenko A.A. Modelling of a single interaction process between a free abrasive pellet and the workpiece. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii*, 2005, no. 5, pp. 308–312. (In Russ.).
- [17] Mirzajanzada A.X., Gurbanov R.S., Ahmadov Z.M. *Hidravlika: ali texniki məktəb və fakültələri üçün dərslik*. Bakı, Maarif nəşriyyatı, 1990. 280 s.
- [18] Gadirov N.B. *Nəzəri mexanika kursu*. Bakı Universiteti nəşriyyatı, 1996. 550 s.

Информация об авторах

СИМОН Сильвио — доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки». Бранденбургский технический университет (01968, Германия, Котбус-Зенфтенберг, Зенфтенберг, Университетская площадь 1, e-mail: sylvio.simon@b-tu.de).

ЮСУБОВ Низами Дамир оглы — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». Азербайджанский технический университет (Az-1073, Баку, Азербайджанская Республика, пр. Гусейн Джавида, д. 25, e-mail: nizami.yusubov@aztu.edu.az).

АМИРЛИ Самир Фариз оглы — докторант кафедры «Технология машиностроения». Азербайджанский Технический Университет (Az-1073, Баку, Азербайджанская Республик, пр. Гусейн Джавида, д. 25, e-mail: amirlsam@b-tu.de).

АМИРОВ Фариз Гачай оглы — доктор технических наук, профессор кафедры «Специальные технологии и оборудование». Азербайджанский технический университет (Az-1073, Баку, Азербайджанская Республика, пр. Гусейн Джавида, д. 25, e-mail: fariz.amirov@aztu.edu.az).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Симон Сильвио, Юсубов Н.Д., Амирли С.Ф., Амиров Ф.Г. Некоторые особенности стружкообразования при гидроабразивной обработке. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 11, с. 53–61.

Please cite this article in English as:

Simon Sylvio, Yusubov N.D., Amirli S.F., Amirov F.G. Certain features of chip formation in the waterjet machining. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 11, pp. 53–61.

Information about the authors

SIMON Sylvio — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Metal Cutting Machines. Brandenburg University of Technology (01968, Germany, Universitätsplatz 1, Cottbus-Senftenberg, Senftenberg, e-mail: sylvio.simon@b-tu.de).

YUSUBOV Nizami Damir — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Azerbaijan Technical University (Az-1073, Baku, Azerbaijan Republic, Huseyn Javid Ave, Bldg. 25, e-mail: nizami.yusubov@aztu.edu.az).

AMIRLI Samir Fariz — Doctoral Candidate, Department of Mechanical Engineering Technology. Azerbaijan Technical University (Az-1073, Baku, Azerbaijan Republic, Huseyn Javid Ave, Bldg. 25, amirlsam@b-tu.de).

AMIROV Fariz Gachay — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Special Technologies and Equipment. Azerbaijan Technical University (Az-1073, Baku, Azerbaijan Republic, Huseyn Javid Ave, Bldg. 25, e-mail: fariz.amirov@aztu.edu.az).