

УДК 621.914

Исследование силовых и энергетических параметров процесса удаления полипропиленового защитного покрытия на стальной основе со сварным швом

Букша Артем Юрьевич^{1(*)}

artyom.buksha@gidrobot.ru

Зубков Николай Николаевич²Карельский Александр Сергеевич²Гроссман Мария Фадеевна²¹ ООО «ТАКО Лайн», подразделение «Гидробот», Москва, Россия² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено экспериментальное исследование по определению силовых и энергетических характеристик процесса удаления защитного полипропиленового покрытия и фрезерования сварного шва с поверхности стальной пластины. Представлены режимы обработки для различных видов фрез и торцовых зачистных щеток, включая частоты вращения, подачи и моменты резания. Показано, что оптимальные режимы обеспечивают снижение энергопотребления при сохранении высокой производительности. Сделаны выводы о применимости различных инструментов в зависимости от требований к режимам обработки. Рекомендованы направления дальнейших исследований для повышения ресурса инструмента и стабильности процесса.

Ключевые слова: полипропилен, фрезерование, зачистная щетка, усилие, момент резания

Study of force and energy parameters of the removing polypropylene protective coating on a steel base with a welded seam

Buksha Artem Yuryevich^{1(*)}

artyom.buksha@gidrobot.ru

Zubkov Sergey Nikolaevich¹Zubkov Nikolai Nikolaevich²Karelskiy Aleksandr Sergeevich²Grossman Maria Fadeevna²¹ Tako Line LLC, Gidrobot Division, Moscow, Russia² BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. An experimental study is presented to determine the force and energy characteristics of the process of removing protective polypropylene coating and milling the weld reinforcement from a steel plate surface. Processing modes are shown for two types of end mills and cup type wire brushes, including spindle speeds, feed rates, and cutting torques. It is demonstrated that optimal modes reduce energy consumption while maintaining high productivity. Conclusions are drawn regarding the applicability of different tools depend-

ing on the processing mode requirements. Directions for further research are proposed to improve tool life and process stability.

Keywords: *polypropylene, milling, weld seam, wire brush, force, torque*

Введение. В последние годы значительно возрос интерес к технологиям очистки подводных трубопроводов от защитных полимерных покрытий и элементов сварных соединений. Актуальность темы обусловлена необходимостью подготовки трубопроводов к ремонту, диагностике и последующей эксплуатации в условиях морской инфраструктуры. Особое внимание уделяется повышению производительности и снижению энергетических затрат при механическом удалении покрытий [1–7].

Целью настоящей работы является экспериментальное определение силовых и энергетических параметров процесса удаления защитного полипропиленового покрытия и фрезерования усиления сварного шва с поверхности стальной пластины. Новизна исследования заключается в комплексной оценке механических характеристик резания при различных вариантах инструментов и режимов обработки, а также в апробации подходов, приближенных к реальным условиям эксплуатации оборудования.

Материалы и методы. В рамках исследования использовались имитаторы сварных труб из стали 20, покрытые полипропиленом толщиной 5 и 6 мм. Для имитации усиления сварного шва наплавлялся валик размером 10×4,3 мм.

В качестве инструмента применялись: трехзубая концевая фреза Ø25 мм и четырехзубая Ø40 мм (P6M5 по ГОСТ 17026–71), торцовые зачистные витые щетки Ø65 и 110 мм, выполненные из углеродистой и нержавеющей стали [8].

Для регистрации силовых параметров использовался измерительный комплекс на базе NI PXI–SCXI-1050 и динамометр Kistler 9257B. Измерения проводились на универсальном фрезерном станке СФ676 с возможностью разворота вертикального шпинделя.

Для каждого режима обработки измерялись и рассчитывались следующие параметры: сила резания, момент резания, усилие подачи, осевое усилие и потребляемая мощность.

Результаты. В рамках исследования были проведены эксперименты по фрезерованию защитного полипропиленового покрытия, удалению наплавленного валика (усиления сварного шва), а также по зачистке от полипропилена поверхности стальной пластины торцовыми витыми щетками. Все параметры приведены в таблицах для различных типов инструмента и режимов обработки. Натяг для щеток определялся как глубина деформации пучков проволоки в рабочем контакте и измерялся по смещению вдоль оси подачи (в миллиметрах).

Фрезерование полипропиленового покрытия. Удаление защитного полипропиленового слоя проводилось с использованием двух фрез разного диаметра. Для каждой серии экспериментов частота вращения шпинделя оставалась постоянной, а подача варьировалась. Ниже представлены результаты для

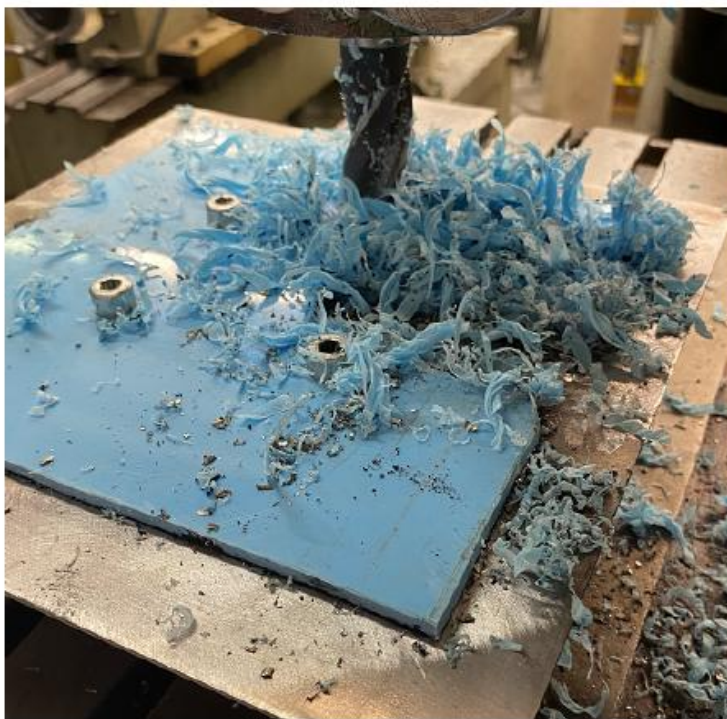
каждого инструмента отдельно. Ниже представлены результаты для каждого инструмента отдельно.

Фреза $\varnothing 25$ мм ($n = 515$ об/мин). Эксперименты с трехзубой фрезой $\varnothing 25$ мм проводились при частоте вращения 500 об/мин. Изменялась скорость подачи в диапазоне от 104 до 255 мм/мин. Результаты приведены в табл. 1.

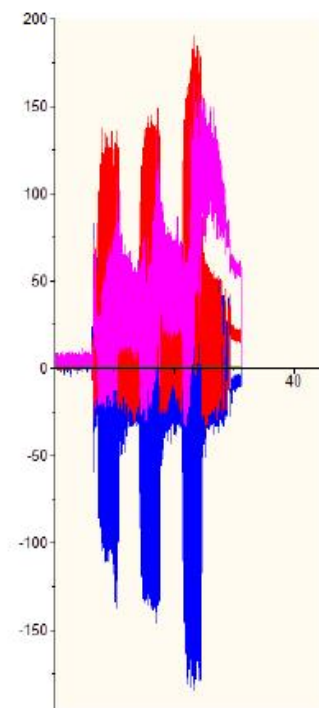
Таблица 1

Параметры фрезерования полипропилена фрезой $\varnothing 25$ мм ($n = 500$ об/мин)

Скорость подачи, $S_{\text{мин}}$, мм/мин	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Окружная сила, P_z , Н	Момент резания, $M_{\text{кр}}$, Н·м	Мощность резания, W , кВт	Усилия подачи, $P_{\text{п}}$, Н	Осевая сила, P_x , Н	Производительность обработки P , м ² /ч
104	0,067	110	1,4	0,074	125	50	0,156
160	0,1	140	1,8	0,094	130	70	0,240
255	0,165	170	2,1	0,114	175	100	0,380



а



б

Рис. 1. Фотография (а) и осциллограмма (б) записи окружной силы P_z (синий график) силы подачи $P_{\text{п}}$ (красный график) и осевой силы P_x (розовый график) при фрезеровании полипропилена толщиной 5 мм концевой фрезой диаметром 25 мм при скорости подачи $S_{\text{мин}} = 104, 160$ и 255 мм/мин

Фреза $\varnothing 40$ мм ($n = 315$ об/мин). Для четырехзубой фрезы $\varnothing 40$ мм частота вращения составляла 315 об/мин. Подача изменялась от 33 до 82 мм/мин. Ниже приведены измеренные параметры при разных режимах.

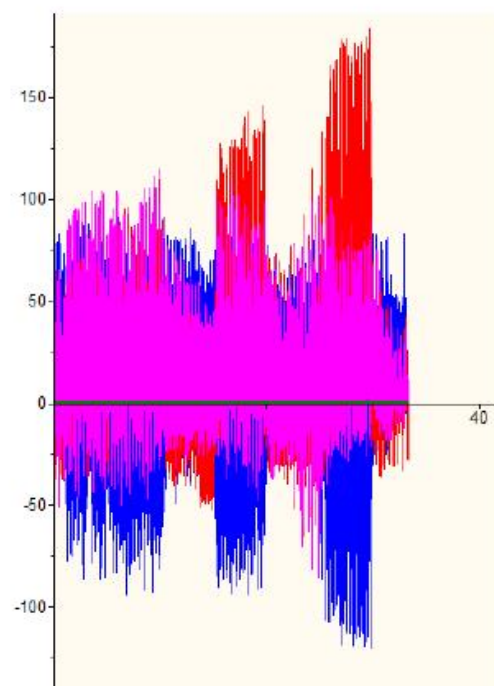
Таблица 2

Параметры фрезерования полипропилена фрезой Ø40 мм ($n = 315$ об/мин)

Скорость подачи, $S_{мин}$, мм/мин	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Окружная сила, P_z , Н	Момент резания, $M_{кр}$, Н·м	Мощность резания, W , кВт	Усилие подачи, P_n , Н	Осевая сила, P_x , Н	Производительность обработки П, м ² /ч
33	0,026	75	1,5	0,05	75	50	0,08
52	0,041	80	1,6	0,053	110	50	0,13
82	0,065	110	2,2	0,073	155	50	0,20



а



б

Рис. 2. Фотография (а) и осциллограмма (б) записи окружной силы P_z (синий график), усилия подачи P_n (красный график) и осевой силы P_x (розовый график) при фрезеровании полипропилена концевой фрезой диаметром 40 мм при скорости подачи $S_{мин} = 33, 52$ и 82 мм/мин

Фрезерование сварного шва совместно с полипропиленовым покрытием. Удаление сварного шва проводилось с использованием тех же фрез, что и при обработке полимерного покрытия — Ø25 и Ø40 мм. Частота вращения шпинделя оставалась постоянной: 515 и 315 об/мин соответственно. Для обоих инструментов рассматривались два направления подачи — продольное и поперечное. Подачи выбирались исходя из условий резания по металлу и соответствовали значениям, обеспечивающим устойчивый сьем материала без перегрузки инструмента.

Фреза Ø25 мм ($n = 515$ об/мин), продольное направление. Фрезерование сварного шва фрезой Ø25 мм проводилось при подаче от 104 до 255 мм/мин. Результаты приведены в табл. 3.

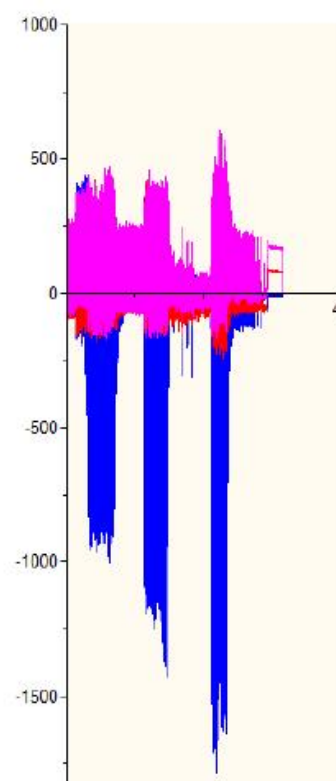
Таблица 3

Параметры фрезерования наплавленного усиления фрезой Ø25 мм ($n = 515$ об/мин)

Скорость подачи, $S_{\text{мин}}$, мм/мин	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Окружная сила, P_z , Н	Момент резания, $M_{\text{кр}}$, Н·м	Мощность резания, W , кВт	Усилие подачи, P_n , Н	Осевая сила, P_x , Н	Производительность обработки П, м ² /ч
104	0,067	850	10,6	0,57	350	450	0,16
160	0,100	1200	15,0	0,81	350	450	0,24
255	0,165	1500	18,8	1,01	350	520	0,38



а



б

Рис. 3. Продольное фрезерование усиления валика сварного шва концевой трехзубой фрезой диаметром 25 мм (а) и осциллограмма (б) составляющих силы резания при подачах $S_{\text{мин}} = 104, 160$ и 255 мм/мин. Синий цвет — окружная сила резания P_z , красный — усилие подачи P_n , розовый — осевая сила P_x

Фреза Ø40 мм ($n = 315$ об/мин), продольное направление. Фрезерование сварного шва фрезой Ø40 мм проводилось при подаче от 33 до 82 мм/мин. Результаты приведены в табл. 4.

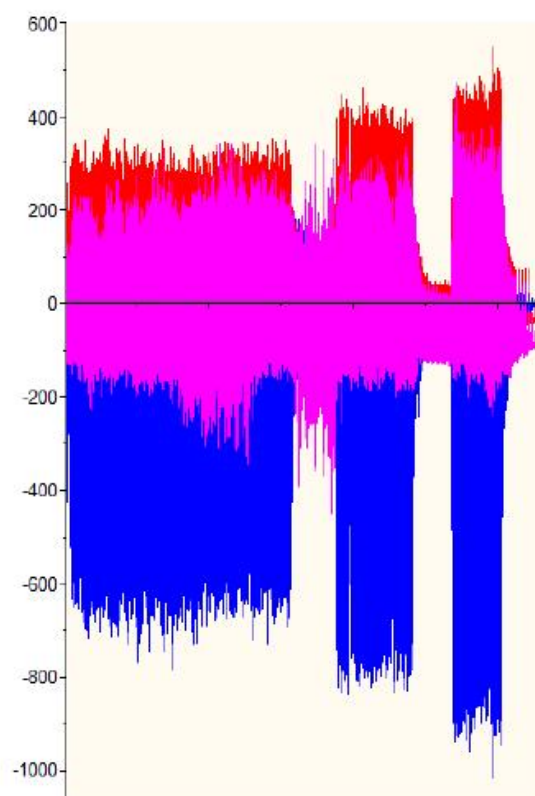
Таблица 4

Параметры фрезерования наплавленного усиления фрезой Ø40 мм ($n = 315$ об/мин)

Ско- рость подачи, $S_{\text{мин}}$, мм/мин	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Окруж- ная сила, P_z , Н	Момент резания, $M_{\text{кр}}$, Н·м	Мощ- ность резания, W , кВт	Уси- лие пода- чи, $P_{\text{п}}$, Н	Осе- вая сила, P_x , Н	Произво- дительно- сть обра- ботки Π , м ² /ч
33	0,026	600	12,0	0,40	350	200	0,08
52	0,041	750	15,0	0,50	400	250	0,12
82	0,065	900	18,0	0,59	430	300	0,20



а



б

Рис. 4. Продольное фрезерование усиления сварного шва концевой четырехзубой фрезой диаметром 40 мм (а) и осциллограмма (б) составляющих силы резания при скорости подачи $S_{\text{мин}} = 33, 52$ и 82 мм/мин. Синий цвет — окружная сила резания P_z , красный — усилие подачи $P_{\text{п}}$, розовый — осевая сила P_x

Фреза Ø25 мм ($n = 515$ об/мин), поперечное направление. Фрезерование сварного шва фрезой Ø25 мм проводилось при подаче 160 мм/мин. Результаты приведены в табл. 5.

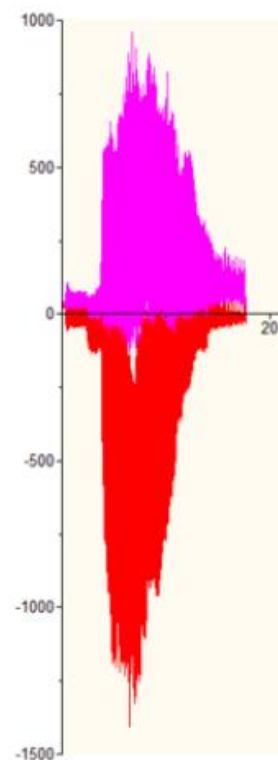
Таблица 5

Параметры поперечного фрезерования наплавленного усиления фрезой Ø25 мм

Скорость подачи, $S_{мин}$, мм/мин	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Окружная сила, P_z , Н	Момент резания, $M_{кр}$, Н · м	Мощность резания, W , кВт	Усилие подачи, $P_{п}$, Н	Осевая сила, P_x , Н	Производительность обработки П, м ² /ч
160 (воз- (воз- можно, был скол кромки)	0,1	1300	26	0,88	750	750	0,24



а



б

Рис. 5. Фотография (а) и осциллограммы (б) составляющих сил резания при перерезании усиления сварного шва концевой трехзубой фрезой диаметром 25 мм при скорости подачи $S_{мин} = 160$ мм/мин (возможно, был скол режущей кромки). Левый график красным цветом — окружная сила P_z , правый график синим цветом — усилие подачи P_p . Розовый цвет — осевое усилие P_x . (смена цветов P_z и P_p обусловлена изменением направления подачи, по сравнению с продольным фрезерованием усиления сварного шва)

Поперечное направление сопровождается ростом момента резания и усилий, особенно при повышении подачи. При этом возможно кратковременное превышение предельных нагрузок в отдельных точках контакта. В условиях недостаточной жесткости системы фрезерования и при вибрациях наблюда-

ется риск скола режущей кромки. Это ограничивает применимость режима на нестабильных участках трубопровода.

Испытания при подаче 130 мм/мин проводились с новой фрезой Ø25 мм, идентичной по геометрии и материалу. По сравнению с предыдущими замерами наблюдается снижение момента резания и осевого усилия. Это может быть связано с улучшенным качеством кромки нового инструмента и снижением вибраций. Также отсутствовали признаки перегрева или нестабильности процесса.

Таблица 6

Параметры поперечного фрезерования наплавленного усиления фрезой Ø25 мм (новая фреза)

Скорость подачи, $S_{\text{мин}}$, мм/мин	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Окружная сила, P_z , Н	Момент резания, $M_{\text{кр}}$, Н · м	Мощность резания, W , кВт	Усилие подачи, $P_{\text{п}}$, Н	Осевая сила, P_x , Н	Производительность обработки П, м ² /ч
130 (новая фреза)	0,084	1000	20	0,67	750	200	0,2

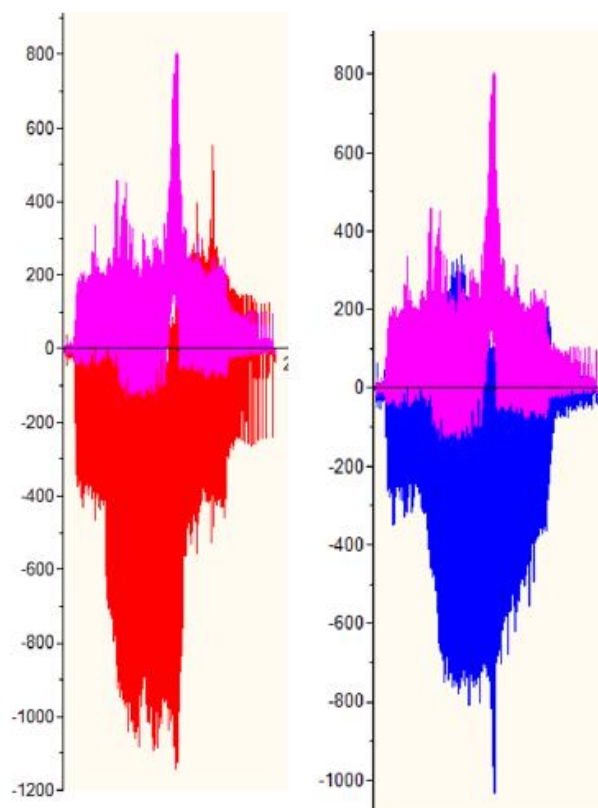


Рис. 6. Осциллограммы составляющих сил резания при перерезании усиления сварного шва концевой трехзубой новой фрезой диаметром 25 мм при скорости подачи $S_{\text{мин}}=130$ мм/мин. *Левый график красным цветом — окружная сила P_z , правый график синим цветом — усилие подачи $P_{\text{п}}$. Розовый цвет — осевое усилие P_x*

Фреза $\varnothing 40$ мм ($n = 315$ об/мин), поперечное направление. Фрезерование сварного шва фрезой $\varnothing 40$ мм проводилось при подаче 104 мм/мин. Результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7

Параметры поперечного фрезерования наплавленного усиления фрезой $\varnothing 40$ мм

Скорость подачи, $S_{\text{мин}}$, мм/мин	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Окружная сила, P_z , Н	Момент резания, $M_{\text{кр}}$, Н·м	Мощность резания, W , кВт	Усиление подачи, P_n , Н	Осевая сила, P_x , Н	Производительность обработки Π , м ² /ч
104	0,083	1200	24	0,79	900	390	0,25

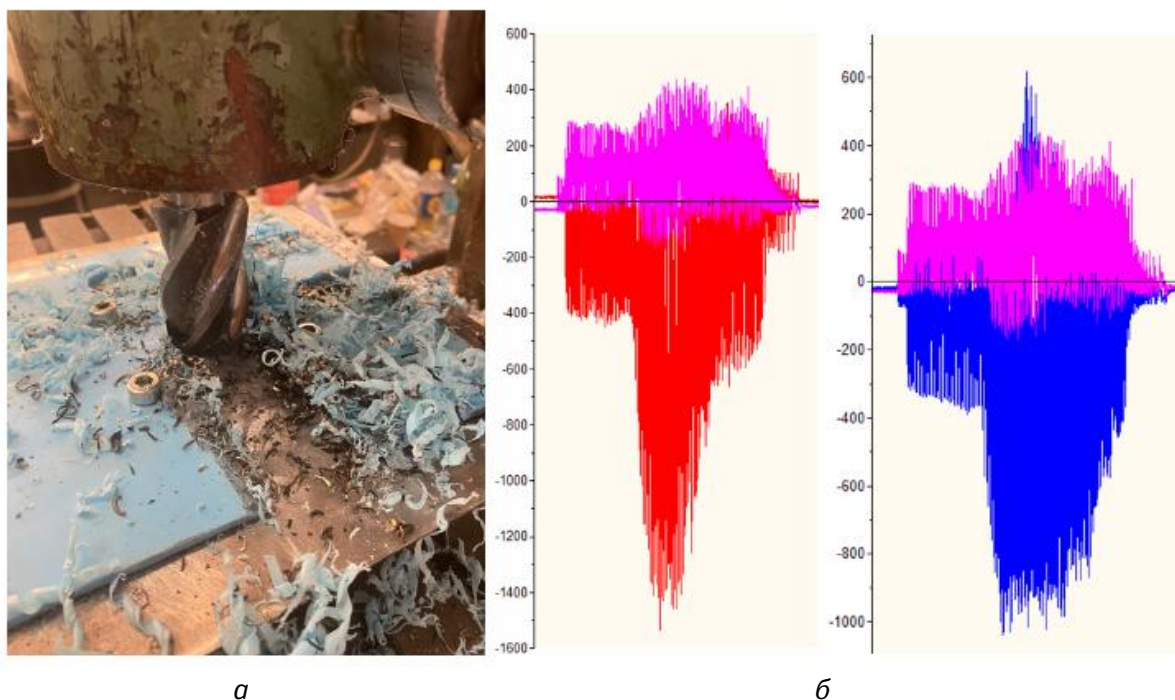


Рис. 7. Фотография (а) и осциллограммы (б) составляющих силы резания при перерезании валика усиления сварного шва концевой четырехзубой фрезой диаметром 40 мм при скорости подачи $S_{\text{мин}} = 104$ мм/мин. Левый график красным цветом — окружная сила P_z , правый график синим цветом — усилие подачи P_n . Розовый цвет — осевое усилие P_x

Зачистка полипропиленового покрытия торцовыми щетками. Очистка поверхности от защитного полипропиленового покрытия проводилась с использованием торцевой витой щетки $\varnothing 65$ мм. Частота вращения шпинделя составляла 315 об/мин. Для повышения стабильности процесса щетка разворачивалась против направления подачи на угол до 10° , что позволяло сформировать устойчивую стружку и избежать налипания материала. Режим испытаний: подача 104 мм/мин, разворот щетки 10° , натяг 0,75 мм. Натяг

определялся как осевое смещение щетки, при котором происходила деформация проволочных пучков и обеспечивалось контактное давление. Результаты представлены в табл. 8.

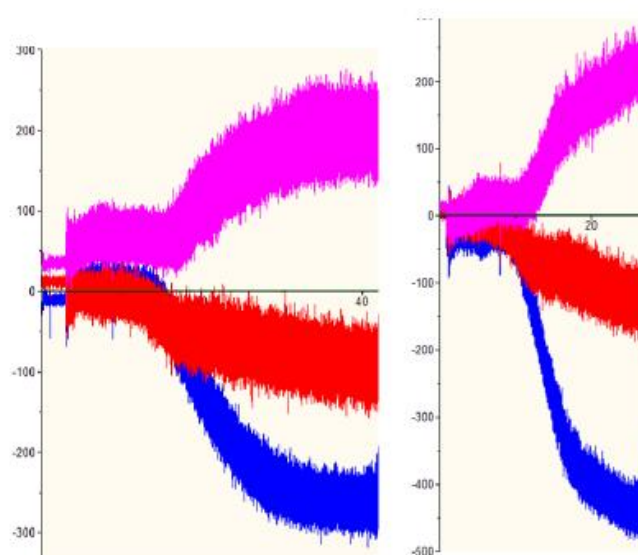
Таблица 8

**Параметры зачистки полипропиленового покрытия щеткой Ø65 мм
($n = 315$ об/мин, подача 104 мм/мин, разворот 10° , натяг 0,75 мм)**

Скорость подачи, $S_{мин}$ мм/мин	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Окружная сила, P_z , Н	Момент резания, $M_{кр}$, Н·м	Мощность резания, W , кВт	Уси-лие подачи, P_n , Н	Осе-вая сила, P_x , Н	Произво-дительность обработки П, м ² /час
64	40	250	6,5	1,40	90	190	0,15
104	40	450	11,7	2,55	130	200	0,25



а



б

Рис. 8. Фотография (а) и осциллограммы (б) составляющих сил резания при работе торцевой щетки при развороте ее торца против направления подачи: б — при скорости подачи $S_{мин} = 64$ мм/мин, в — при скорости подачи $S_{мин} = 104$ мм/мин. Синий цвет — окружная сила резания P_z , красный — усилие подачи P_n , розовый — осевая сила P_x

Работа щетки без разворота сопровождалась нестабильным съемом покрытия: происходило быстрое нагревание, расплавление полипропилена и налипание на проволоку. Стружка не формировалась, происходило размазывание материала с выделением дыма. Такие режимы признаны неработоспособными (рис. 9).



Рис. 9. Заполнение торцевой щетки расплавленным полипропиленом

Обсуждение полученных результатов. Экспериментально подтверждена возможность эффективного удаления как защитного полипропиленового покрытия, так и выступающего сварного шва с поверхности стальной трубы с использованием механических средств — фрез $\varnothing 25$ и $\varnothing 40$ мм, а также торцевых зачистных щеток. Фреза $\varnothing 25$ мм при частоте вращения 515 об/мин демонстрирует минимальные значения момента резания и осевого усилия, что позволяет применять ее в составе маломощных приводных систем при сохранении производительности до $0,38 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Зафиксировано устойчивое возрастание всех силовых параметров при переходе от продольного к поперечному направлению подачи: осевое усилие и момент увеличиваются на 30–40 %, что связано с особенностями врезания и деформации зоны контакта. Для $\varnothing 25$ мм на режимах поперечного фрезерования зафиксирована чувствительность к вибрациям и риск скола режущей кромки при недостаточной жесткости системы. Это критично для нестабильных участков трубопровода и требует ограничения глубины врезания.

Зачистка полипропиленового покрытия торцевыми щетками $\varnothing 65$ мм при развороте торца на 10° против направления подачи обеспечивает устойчивое формирование гранулированной стружки и полное удаление покрытия без оплавления. Однако при этом осевое усилие достигает 450 Н, а мощность — 2,55 кВт, что требует высокой точности позиционирования, контроля натяга и конструктивного ограничения подачи.

Работа щетки без разворота сопровождается нестабильным процессом: отсутствует сьем стружки, происходит нагрев, оплавление и налипание расплавленного полимера на проволоочные пучки. Такие режимы признаны неработоспособными и исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Заключение. В ходе работы проведено экспериментальное исследование по удалению защитного полипропиленового покрытия и выступающего сварного шва с поверхности стальной трубы с использованием механических средств обработки. Рассмотрены два типа фрез (Ø25 и Ø40 мм) и торцовая щетка Ø65 мм при различных режимах подачи, направлениях обработки и частотах вращения. Установлены рабочие режимы для фрезерования покрытия и сварного шва с допустимыми значениями усилий, моментов и мощности. Показано, что при соблюдении рекомендованных параметров (частота вращения, подача, направление) возможно достижение производительности до 0,59 м²/ч при контролируемой нагрузке на привод. Для зачистки покрытия щеткой определены параметры, при которых обеспечивается устойчивое формирование стружки и стабильный сьем материала. Режим без разворота признан неработоспособным. Разворот щетки против подачи и контроль натяга позволяют исключить перегрев и налипание, однако сопровождаются высокими значениями мощности и осевого усилия. Полученные результаты могут быть использованы при выборе инструмента, расчете режимов и проектировании оборудования для механической зачистки подводных трубопроводов. Перспективным направлением является экспериментальная проверка режимов в водной среде и исследование поведения инструмента при циклической нагрузке.

Список источников

- [1] Дмитриев А.М. *Технология машиностроения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, 320 с.
- [2] Грановский Г.И., Грановский В.Г. *Резание металлов*. Москва, Высшая школа, 1985, 471 с.
- [3] Минаев А.М. *Обработка металлов резанием*. Тамбов, Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008, 96 с.
- [4] Смирнов М.Ю., Циркин А.В. *Процессы механической обработки и пути их интенсификации: программа, вопросы для самопроверки и задания для выполнения контрольных работ*. Ульяновск, УлГТУ, 2009, 27 с.
- [5] Марков А.М. *Технология машиностроения и станкостроение. Ползуновский альманах*, 2018, № 3, с. 45–52.
- [6] Юркевич В.И. *Подводные технические работы*. Санкт-Петербург, Изд-во политехн. ун-та, 2014, 280 с.
- [7] Хренов К.К. *Подводная сварка и резка металлов*. Москва, Машиностроение, 1980, 240 с.
- [8] ГОСТ 17026–71. *Фрезы концевые из быстрорежущей стали. Технические условия*. Москва, Изд-во стандартов, 1971.